

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv filtrů v přívodním vedení na činnost
střídavého pohonu**

**The effect of filters in the supply cable on alternate drive
operation**

zadání

Anotace

Tématem diplomové práce bylo naměřit a vyhodnotit vliv filtrů na vstupu do střídavého pohonu. Střídavý pohon se skládal ze střídavého asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem SIMOVERT MASTERDRIVES společnosti Siemens umožňující skalární a vektorové řízení. Zatěžování pohonu bylo realizováno stejnosměrným motorem regulovaným řízeným usměrňovačem napětí SIMOREG společnosti Siemens. Jako filtr byla použita filtrační tlumivka a síťový odrušovací filtr dodávaný společností Siemens přímo k frekvenčnímu měniči.

Byly změřeny průběhy proudů a napětí při předem stanovených podmínkách (frekvencích přiváděného napětí, modulačních frekvencích) napájecího napětí pohonu s různými kombinacemi filtrů. K zaznamenání průběhů byly použity vícekanálové digitální osciloskopy s možností exportovat data přes sériové rozhraní RS232. Průběhy byly přeneseny do počítače, zpracovány, a poté vyhodnoceny s ohledem na teorii.

Resume

The subject of this thesis was to measure and analyze the influence of AC drive input filters. An AC drive consists of an asynchronous electric motor driven by a SIMOVERT MASTERDRIVES frequency converter, made by Siemens. The converter supports both scalar and vector control. Drive load represents a DC motor, controlled by a voltage-controlled rectifier SIMOREG, also made by Siemens. An impedance coil and filter were used as input filters. These components are supplied directly with a frequency converter.

Current and voltage characteristics of the drive voltage for the given conditions (supply voltage frequencies, modulation frequencies) using different filter combinations were recorded. Multichannel digital oscilloscopes with a data export option were used as the recording devices. Data was exported via a RS232 interface into a computer, then evaluated and compared with theoretical information.

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Kubínovi za vedení, cenné rady a podporu při tvorbě diplomové práce. Dále děkuji své konzultantce Doc. Ing. Evě Konečné, CSc.

Děkuji také všem ostatním, kteří mi poskytli jakoukoliv pomoc při vypracování diplomové práce.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Obsah

Úvod.....	9
Teoretická část.....	10
1. Elektromagnetická kompatibilita	10
2. Vstupní filtr	11
3. Filtrační tlumivka	11
4. Zdroje proměnného kmitočtu (frekvenční měniče).....	12
4.1. Přímé měniče kmitočtu	12
4.2. Nepřímé měniče kmitočtu.....	12
4.2.1. Usměrňovače.....	12
4.2.2. Střídače	13
5. Regulační struktury střídačů	17
5.1. Skalární metody řízení	17
5.2. Vektorové metody řízení	19
5.3. Přímé metody řízení	20
6. Inkrementální čidlo rychlosti	20
Experimentální část.....	22
7. Měření při různých kombinacích připojení asynchronního motoru k napájecí síti	22
7.1. Vlastní měření	22
7.1.1. Frekvenční měnič – Asynchronní motor.....	24
7.1.1.1. Schéma zapojení, podmínky měření.....	24
7.1.1.2. Změřené průběhy proudů a napětí.....	25
7.1.1.3. Vyhodnocení uspořádání Měnič – Motor.....	35
7.1.2. Frekvenční měnič – Filtrační tlumivka – Asynchronní motor	36
7.1.2.1. Schéma zapojení, podmínky měření.....	36
7.1.2.2. Změřené průběhy proudů a napětí:.....	37
7.1.2.3. Vyhodnocení uspořádání Měnič – Tlumivka – Motor	42
7.1.3. Vstupní filtr – Měnič frekvence – Asynchronní motor	43
7.1.3.1. Schéma zapojení, podmínky měření.....	43
7.1.3.2. Změřené průběhy proudů a napětí.....	44

7.1.3.3. Vyhodnocení uspořádání Filtr – Měnič – Asynchronní motor	50
7.1.4. Vstupní filtr – Měnič frekvence – Filtrační tlumivka - Asynchronní motor.....	50
7.1.4.1. Schéma zapojení, podmínky měření	50
7.1.4.2. Změřené průběhy proudů a napětí	52
7.1.4.3. Vyhodnocení uspořádání Filtr – Měnič – Tlumivka – Asynchronní motor	62
8. Měření při různých způsobech řízení	62
8.1. Vlastní měření	62
8.1.1. Chování asynchronního motoru při rozběhu naprázdno s různými způsoby řízení	64
8.1.1.1. Schéma měření, podmínky měření	64
8.1.1.2. Naměřené průběhy	65
8.1.1.3. Vyhodnocení	67
8.1.2. Chování asynchronního motoru při změně zatížení a různém řízení	68
8.1.2.1. Schéma měření, podmínky měření	68
8.1.2.2. Naměřené průběhy	69
8.1.2.3. Vyhodnocení	71
Závěr	72

Úvod

Současný průmysl klade důraz na rychlé a přesné řízení motorů. V minulosti nejvíce využívané stejnosměrné pohony jsou dnes nahrazovány pohony s asynchronními motory. Toto je umožněno rozvojem výkonové elektroniky a její klesající cenou. Důsledkem toho je snižující se cena frekvenčních měničů sloužících k ovládání střídavých motorů. Dnešní střídavé pohony se již požadovanými parametry vyrovnají stejnosměrným, jejich výhodou je však nižší cena a menší rozměry.

Na frekvenční měniče, používané při řízení asynchronních motorů, jsou kladeny vysoké nároky (přesné řízení motorů), proto cílem diplomové práce bylo zjistit, jaký vliv má kombinace filtrů na vstupu pohonu na jeho chování.

Vliv těchto filtrů byl sledován na střídavém pohonu sestávajícím ze střídavého asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem SIMOVERT MASTERDRIVES společnosti Siemens. Zátěž pohonu tvořil stejnosměrný motor ovládaný řízeným usměrňovačem napětí.

Teoretická část diplomové práce je věnována krátkému popisu elektromagnetické kompatibility a jejím důsledkům na funkci a provoz střídavého pohonu. Následuje popis funkce a důvodů používání filtrů v přívodním vedení střídavého pohonu. Největší prostor v teoretické části byl věnován možným způsobům změny napájecí frekvence a jejich vnitřnímu uspořádání. Protože jedním z úkolů diplomové práce bylo porovnání chování asynchronního motoru při různých typech řízení (skalární, vektorové), je jejich princip rovněž součástí teoretické části. Na závěr teoretické části je vysvětlen princip používaného snímače rychlosti otáčení asynchronního motoru.

Experimentální část byla rozdělena do dvou částí. První část je věnována vlivu zapojení přívodního vedení na činnost pohonu a ve druhé části je porovnáváno chování pohonu při různých způsobech řízení realizovaného frekvenčním měničem.

Teoretická část

1. Elektromagnetická kompatibilita

Pojmem elektromagnetická kompatibilita (EMC) se rozumí schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí. Zařízení také nesmí rušit samo sebe.

Základní pravidla pro návrh pohonu v souladu s EMC

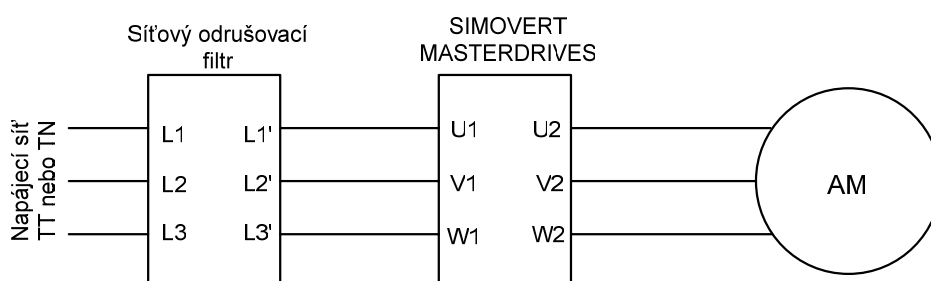
- Signálové a silové kabely musí být vedeny odděleně s minimální vzdáleností 20cm.
- Nestíněné kabely vedoucí do stejného obvodu musí být krouceny nebo vedeny co nejblíže k sobě.
- Nepoužívat kabely delší než je nezbytně nutné, aby nedocházelo ke zvyšování kapacity a indukčnosti.
- Připojení vyhrazených kabelů/vodičů k zemi na obou stranách k dosažení přídavného stínícího efektu.
- Stykače, relé, solenoidy apod. musí být vybaveny zhašecími prvky – například RC článkem, diodou nebo varistorem. Tyto prvky musí být připojeny přímo k cívce.
- Kabely by měly být vedeny co nejblíže uzemněného krytu skříně, aby se redukoval šum.
- Tachometry, enkodéry a resolvery musí být připojeny stíněným kabelem. Tento kabel nesmí být přerušován.
- Pokud je stínění vodičů přenášejících digitální signál nedostatečné, musí být provedeno přístínění o minimální ploše kabelu 10mm².
- Signálové kabely by měly být vedeny pouze z jedné strany panelu nebo skříně.
- Pokud je frekvenční měnič napájen externím 24V napájením, nemělo by být toto napájení použito současně pro napájení více oddělených spotřebičů. Každý frekvenční měnič by měl mít vlastní napájení.

- Frekvenční měnič a jeho řídicí jednotka by měly být napájeny z různých sítí. Pokud je k dispozici pouze jedna společná síť, řídicí jednotka by měla být připojena přes oddělovací transformátor. [1], [2], [3]

2. Vstupní filtr

Jedná se o síťový odrušovací filtr, příklad zapojení je na obr. 1. Důvodem jeho použití je splnění norem EMC (elektromagnetické kompatibility). Filtry se používají pro omezení rušení v pásmu 150 kHz – 30 MHz – toto rušení je sledované a měřené na síťových svorkách. Odrušovací filtry jsou zapojeny (z důvodu ceny a rozměrů) jako kompenzovaná indukčnost. Vektorový součet vstupních proudů musí být roven nule. Prakticky to znamená, že PE svorkou nesmí procházet pracovní proud.

Filtry dimenzujeme napětově a proudově podle jmenovitého vstupního napětí a proudu použitého zařízení. Filtry jsou obvykle schopny přenést bez poškození nárazový proud při zapnutí například frekvenčního měniče na síť (nabití kondenzátoru stejnosměrného meziobvodu). [4]



Obr. 1 Připojení pohonu přes vstupní filtr

3. Filtrační tlumivka

Motorové filtrační tlumivky jsou určeny k použití v pohonech s frekvenčními měniči. Zapojují se na výstup frekvenčních měničů v případě větších délek kabelů mezi měničem a regulovaným motorem. Kabel se totiž při větších délkách chová jako kapacitní zátěž. Jeho impedance, vztažená ke spínací frekvenci výkonových tranzistorů měniče může při větších délkách kabelů způsobit, že je výstup měniče přetěžován, aniž dodává do zátěže jmenovitý proud. Kromě potlačení tohoto jevu

se současně omezí vyzařování rušivých napětí jak z výstupu měniče, tak směrem do napájecí sítě.

Tlumivka zařazená do série se zátěží má filtrační účinek. Zachytává skokové změny napětí na výstupu měniče a tím zmenšuje zvlnění proudu, které by způsobilo změny napětí na ohmické části zátěže. [4], [5]

4. Zdroje proměnného kmitočtu (frekvenční měniče)

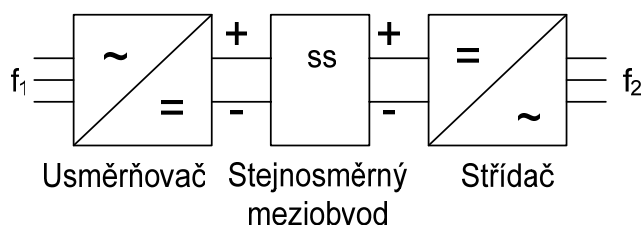
- Přímé měniče kmitočtu
- Nepřímé měniče kmitočtu

4.1. Přímé měniče kmitočtu

Přímé měniče kmitočtu umožňují vytvořit přímo (bez použití stejnosměrného meziobvodu) ze vstupního střídavého napětí o frekvenci f_1 výstupní střídavé napětí s říditelným kmitočtem f_2 . Ve srovnání s nepřímými měniči frekvence však používají značně vyššího počtu součástek.

4.2. Nepřímé měniče kmitočtu

Nepřímý měnič kmitočtu, viz obr. 2, je složen z usměrňovače, který usměrňuje vstupní napětí a proud o frekvenci f_1 , a střídačem, který usměrněné napětí a proud rozstřídá na požadovaný kmitočet f_2 . Stejnosměrný obvod od sebe odděluje oba střídavé obvody a umožňuje nezávislé řízení kmitočtu výstupního obvodu na kmitočtu vstupním. [5], [7], [8]

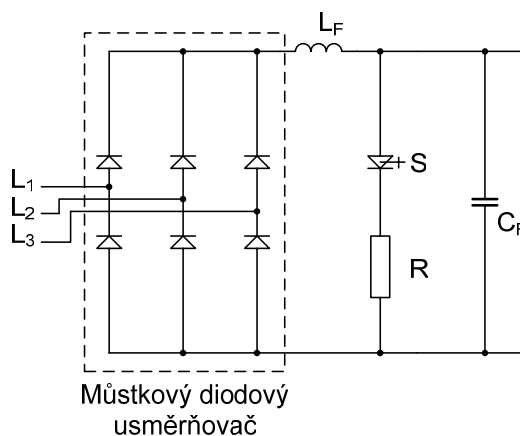


Obr. 2 Obecný nepřímý měnič kmitočtu

4.2.1. Usměrňovače

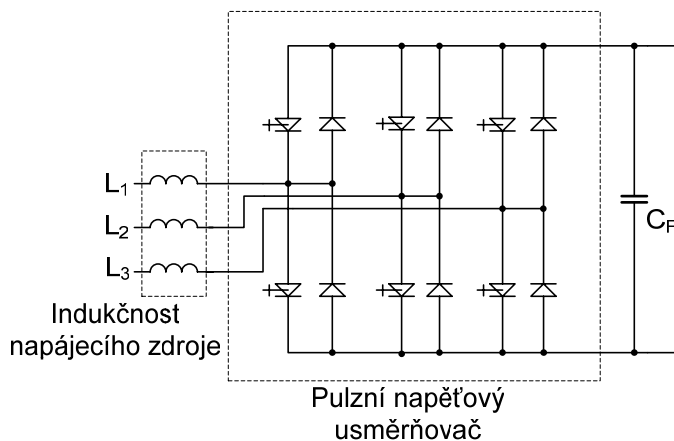
V nejjednodušším případě se používá diodový můstek. Je-li při použití požadována rekuperace energie ze zátěže měniče (např. brzdění) musí se

rekuperovaná energie mařit na odporu R , viz obr. 3. Spínač S lze řídít podle hladiny napětí na C_F .



Obr. 3 Můstkový diodový usměrňovač

Nejlepší variantou je použití pulzního napěťového usměrňovače, viz obr. 4. Tento typ usměrňovače umožňuje vracet rekuperovanou energii do napájecí sítě a také zajišťuje odběr téměř harmonického proudu ve fázi s napětím ze střídavé napájecí sítě. [8]



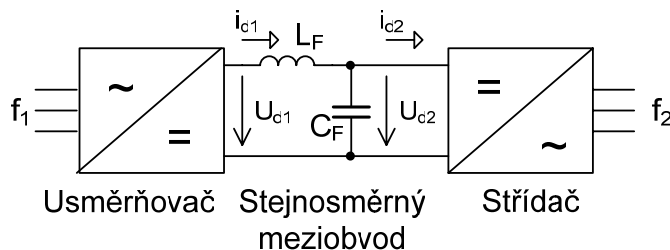
Obr. 4 Pulzní napěťový usměrňovač

4.2.2. Střídače

Podle typu stejnosměrného meziobvodu dělíme nepřímé měniče kmitočtu na:

- Nepřímé měniče s napěťovým střídačem
- Nepřímé měniče s proudovým střídačem

Nepřímé měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem



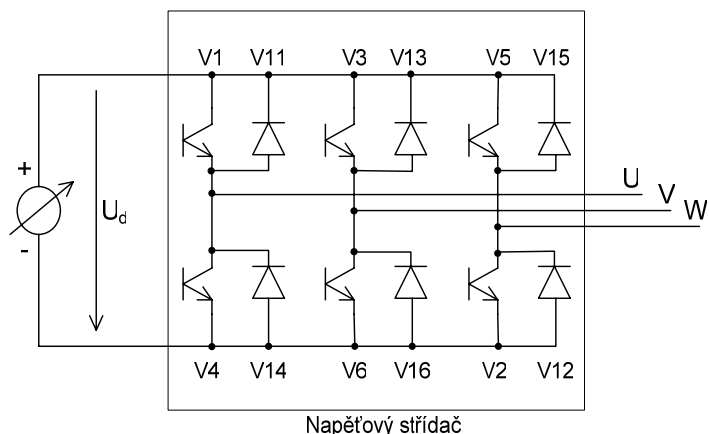
Obr. 5 Nepřímý měnič kmitočtu s napět'ovým střídačem

Stejnoseměrný meziobvod obsahuje filtrační kondenzátor C_F s kapacitou v jednotkách tisíc μF . Stejnoseměrný obvod se chová vzhledem ke střídači jako zdroj napětí. Kondenzátor C_F spolu s tlumivkou L_F tvoří vstupní filtr napět'ového střídače. Tlumivka vyhlazuje proud z usměrňovače, mnohdy tlumivku nahrazuje rozptylová indukčnost transformátoru, přes který je usměrňovač připojen k napájecí síti.

a) Střídač napět'ového typu s amplitudovým řízením

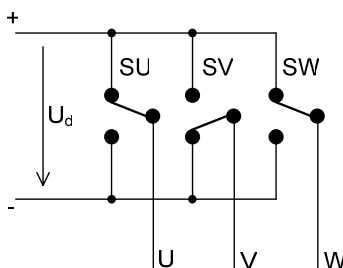
Tento způsob řízení se také nazývá „obdélkové řízení“. V tomto typu nepřímého měniče frekvence je vzhledem k jednoduchosti spínání nemožné měnit amplitudu základní harmonické výstupního napětí. Proto při požadavku změny amplitudy výstupního napětí je nutné použít na vstupu řízený usměrňovač napětí umožňující řízení U_d v rozsahu 0 až U_{dmax} nebo stroj při zvyšující se rychlosti odbuzovat. V praxi se používá pouze způsob, při němž odpadá použití řízeného usměrňovače. Má lepší dynamiku změn, neboť nedochází ke zpomalení při nabíjení a vybíjení kondenzátoru o velké kapacitě.

Střídač je osazen vypínatelnými součástkami (tranzistory, GTO tyristory, tyristory s vypínacími obvody) s antiparalelně zapojenými diodami na každé vypínatelné součástce, viz obr. 6.



Obr. 6 Schéma třífázového střídače s napěťovým meziobvodem

Součástky V1 až V6 s jejich antiparalelní diodou lze nahradit spínačem. Vždy dva spínače připojené na stejnou výstupní fázi nahradíme jedním spínačem (nesmí dojít k současnému sepnutí těchto spínačů, nastal by zkrat stejnosměrného meziobvodu bez omezení zkratového proudu). Po této úpravě dostaneme náhradní schéma měniče frekvence s napěťovým meziobvodem viz obr. 7.



Obr. 7 Náhradní schéma třífázového měniče frekvence s napěťovým meziobvodem

Každý přepínač má dva stavy:

- Výstupní fáze je připojena na kladný pól kondenzátoru (označení +)
- Výstupní fáze je připojena na záporný pól kondenzátoru (označení -)

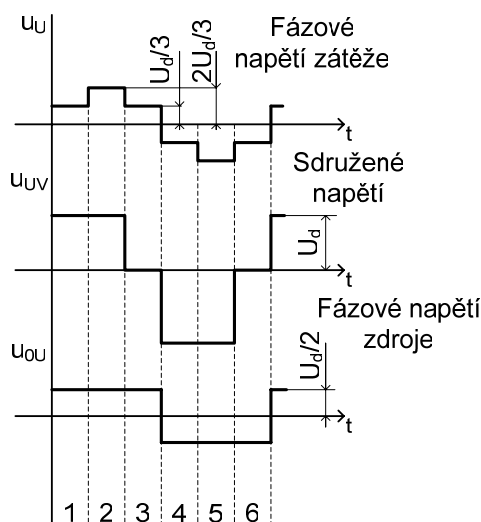
Existuje osm různých kombinací sepnutí, z toho kombinace všechny fáze na kladný a na záporný pól nejsou při tomto řízení využívány (kombinace 7, 8 ve spínací tabulce, viz tab. 1). V ostatních šesti kombinacích je vždy jedna fáze připojena na některý z pólů kondenzátoru a zbylé dvě fáze na pól opačný. Napětí

na fázi, která je připojena samostatně, je dvojnásobné opačné polarity oproti zbylým dvěma fázím.

Tab. 1 Tabulka možných kombinací spínání

	SU	SV	SW
1	+	-	+
2	+	-	-
3	+	+	-
4	-	+	-
5	-	+	+
6	-	-	+
7	+	+	+
8	-	-	-

Na základě spínací tabulky, tab. 1, lze nakreslit časové průběhy fázových napětí na zátěži, sdružených napětí a napětí fází vůči fiktivnímu středu filtračního kondenzátoru ve stejnosměrném meziobvodu viz obr. 8.

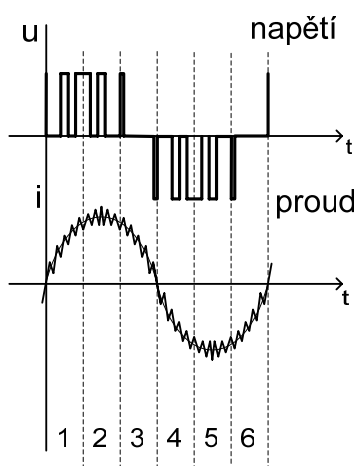


Obr. 8 Průběhy napětí střídače při amplitudovém řízení

b) Střídač napětového typu se šířkově pulzní modulací

Jde o nejčastější způsob řízení napětových střídačů. Napájecí napětí ve stejnosměrném meziobvodu zůstává konstantní a je rovné U_{dmax} . Při přepínání využíváme i kombinací přepnutí 7, 8, viz tab. 1, kdy je zátěž ve zkratu a napájecí

napětí na zátěži je tedy nulové. Přepínače jsou spínány s mnohem větší frekvencí, než je frekvence výstupního napětí (frekvence spínání je omezena vlastnostmi použitých spínacích součástek, a to 10^3 až 10^4 pro výkonové tranzistory a 10^2 až 10^3 pro GTO tyristory nebo rychlé tyristory s vypínacími obvody). Fázová napětí jsou během jedné periody tvořena více obdélníky. Poměrem šířek kladných a záporných ploch jednotlivých obdélníků, lze měnit střední hodnotu napětí každého obdélníku, při správném řízení je sled středních hodnot blízký sinusovému průběhu.



Obr. 9 Proud a napětí na zátěži při pulzně šířkové modulaci

5. Regulační struktury střídačů

Rozlišujeme tři struktury řízení střídačů:

- Skalární metody
- Vektorové metody
- Přímé metody

5.1. Skalární metody řízení

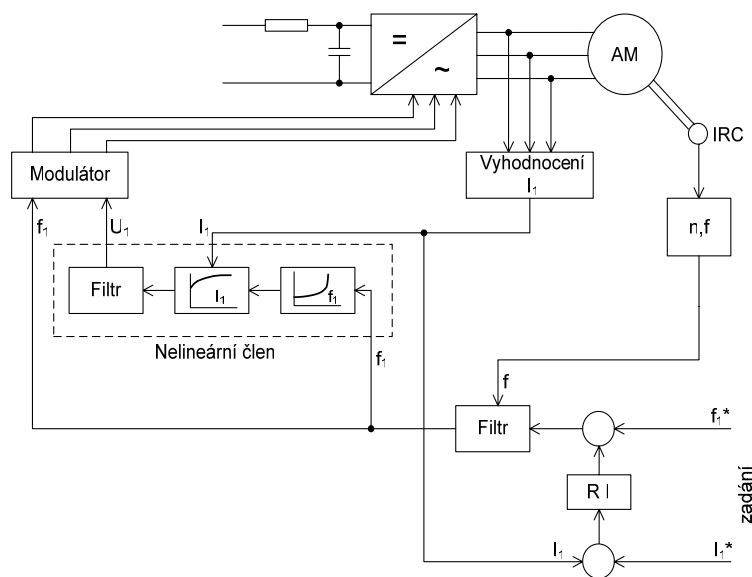
Tyto metody řízení měničů kmitočtu jsou poměrně jednoduché na realizaci, ale nedovolují dosáhnout špičkových dynamických parametrů pohonů, proto jsou tyto metody používány ve starších měničích nebo v jednodušších aplikacích pohonů.

Kmitočet a další parametry jsou považovány za skalární veličiny. Výstupem regulačního algoritmu je požadovaný kmitočet a napětí střídače. Modulátor poté generuje tyto požadované hodnoty.

Skalární řízení lze dělit na dva typy:

- Kmitočtově proudové
- Kmitočtově napěťové

Kmitočtově napěťové řízení



Obr. 10 Princip kmitočtově napěťového řízení

Při tomto typu řízení je udržován poměr mezi ω_1 a U_1 . Pro zvolenou optimalizaci je třeba tento vztah korigovat s ohledem na zatížení. Jelikož statorový kmitočet není vytvářen ze součtu měřené otáčivé rychlosti a zadaného rotorového kmitočtu, není třeba přesné měření rychlosti. Signál z tachogenerátoru je využit pro blokování změn statorového kmitočtu, kde by rozdíl zadaného a měřeného kmitočtu měl překročit maximální rotorový kmitočet.

Podle zadaného zrychlení jsou určeny hodnoty f_1^* a I_1^* ze strmosti jejich nárůstů. Hodnota f_1^* je ještě modifikována podle provozního stavu (motor, generátor). Požadované napětí je vytvořeno v nelineárním členu jako funkce kmitočtu s modifikováním podle statorového proudu. Regulátor proudu udržuje statorový proud na zadané hodnotě omezením změny kmitočtu. [7], [6]

5.2. Vektorové metody řízení

Tato metoda řízení je vhodná pro rychlé změny zatížení nebo otáčivé rychlosti, protože skalárním řízením nejsme schopni dosáhnout požadované dynamiky pohonu.

Vektorové řízení je založeno na principu rozdělení statorového proudu na tokotvornou a momentotvornou složku. Statorové proudy asynchronního motoru lze vyjádřit pomocí prostorového vektoru. Pokud chceme tento vektor regulovat, lze buď regulovat jeho složky po transformaci do souřadného systému, kde jsou tyto složky kvazistejnoseměrné (regulace složek I_d –tokotvorná, I_q –momentotvorná), nebo regulovat jeho modul a úhel v takovém souřadném systému, kde je úhel kvazistacionární (modul prostorového vektoru statorového proudu a jeho úhlu vůči vektoru rotorového magnetického toku).

Regulační struktury pohonů s asynchronním strojem pracují s jeho vnitřními veličinami, které musíme získávat výpočtem. K tomu se využívá matematický model AS, založený na diferenciálních rovnicích AS. Nejčastěji používané jsou dva typy modelů $I_1 - n$ pro nízké otáčivé rychlosti a $U_1 - I_1$ pro vyšší otáčivé rychlosti. Nejlépe je počítat oba modely současně a vážit jejich výsledky podle aktuální hodnoty rychlosti.

Při vektorové regulaci je třeba mít informaci o poloze souřadného systému d, q (souřadnice rotující synchronní rychlostí s magnetickým tokem) vůči statoru. Tato poloha lze měřit přímo (měření polohy magnetického toku ve vzduchové mezeře pomocí Hallových sond), ale pro svoji složitost se dnes již téměř nepoužívá (speciálně upravený motor na připojení čidel). [7], [6]

V současné době se používají nepřímé metody pro určení souřadných os d, q , které lze rozdělit na dvě skupiny:

- Nepřímá metoda s čidlem rychlosti rotoru
- Nepřímá metoda s čidly napětí

5.3. Přímé metody řízení

Jde o metodu přímé regulace momentu označovanou jako DSR (DTC), která patří k nejmodernějším způsobům regulace asynchronních strojů.

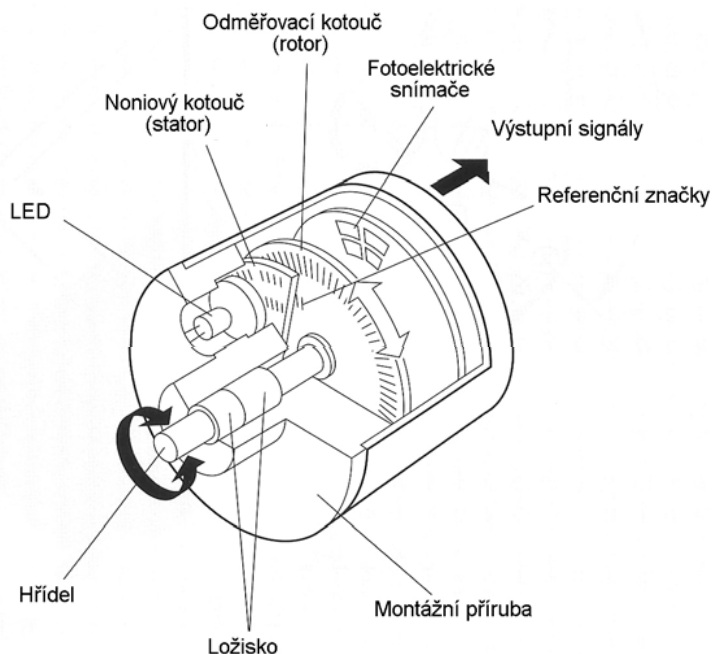
Pracuje se s transformací do statorových souřadnic α, β . Zde se nereguluje vektor statorového proudu, ale přímo moment ve zvoleném tolerančním pásmu a průběh prostorového vektoru magnetického toku po zadané křivce. Obě veličiny jsou vyhodnoceny z měřených veličin pomocí matematického modelu asynchronního stroje. Měření a výpočty musí být tak rychlé, aby šlo v každém okamžiku rozhodnout, je-li třeba moment zvětšovat nebo zmenšovat. [6], [7]

6. Inkrementální čidlo rychlosti

Pro snímání rychlosti otáčení se nejčastěji používá inkrementální čidlo polohy s nulovým impulzem. Tento typ čidla byl použit pro měření otáček asynchronního motoru.

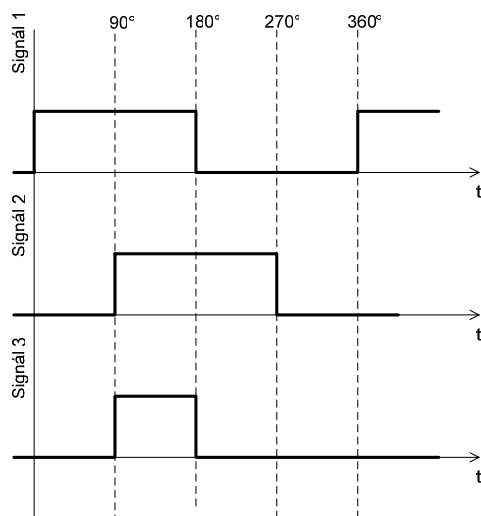
Toto čidlo udává počtem impulzů úhel natočení měřeného hřídele. Stanovením počtu impulzů za jednotku času získáme hodnotu rychlosti otáčení hřídele. Pokud chceme mít informaci o směru otáčení, používají se dva snímače posunutě o 90° elektrických.

Nejčastěji používané je optoelektrické inkrementální čidlo, viz obr. 11 na str. 21. Odměřovací kotouč je dělený pomocí střídání průhledných a neprůhledných čárek (obvykle 250, 500, 1024, 4096 dílů) a je umístěn na rotoru. Noniový kotouč je tvořen stejným způsobem a je připevněn na statoru. Rastry rotoru a statoru jsou prosvětlovány rovnoběžným svazkem paprsků. Tento svazek paprsků je při otáčení přerušován a dopadá na fotoelektrické snímače.



Obr. 11 Konstrukce inkrementálního čidla

Signály ze snímačů jsou zpracovány a upraveny na TTL signál. Otáčením hřídele získáváme tři elektrické signály obdélníkového průběhu. První dva signály jsou fázově vzájemně posunuty o 90° nebo -90° , což nám dává informaci o směru otáčení. Třetí signál je tzv. nulový pulz, který je tvořen jedním pulzem na otočení hřídele a slouží k nastavení referenční nulové polohy. Lze jím též kontrolovat správný počet pulzů prvních dvou signálů viz obr. 12. [9]



Obr. 12 Průběhy signálů na výstupu impulzního snímače rychlosti otáčení

Experimentální část

7. Měření při různých kombinacích připojení asynchronního motoru k napájecí síti

7.1. Vlastní měření

Měření probíhalo na třífázovém asynchronním motoru Siemens, který byl zatěžován stejnosměrným motorem společnosti Siemens na jmenovitou hodnotu proudu 3,8 A. Použité přístroje jsou uvedeny v příloze č.1.

Na frekvenčním měniči byly nastavovány různé požadavky a to modulační frekvence f_{mod} a frekvence výstupního napětí frekvenčního měniče f_{nap} (řízení otáček asynchronního motoru).

Pro všechna měření bylo nastaveno vektorové řízení otáček s použitím snímače otáček (parametr měniče P163 nastaven na hodnotu 4).

Protože změna hodnoty modulační frekvence byla v celých násobcích, nemusela být po její změně provedena parametrizace frekvenčního měniče.

Při snímání průběhů sdruženého napětí osciloskopem OSC1 byl řešen problém vzniklý přenosem naměřených dat z osciloskopu do počítače k dalšímu zpracování a zobrazení. Tento problém spočíval v tom, že osciloskop je schopen na jedno měření zaznamenat až 2,5 miliónu měřených hodnot, ale pomocí softwaru Agilent Excel 54600 toolbar, který vytvoří makra do programu Microsoft Excel, je možno přenést maximálně 2000 měřených hodnot. Tento problém bylo možno řešit dvěma způsoby:

- Použitím softwaru Data capture for 54620 Intuilink, dostupném na internetových stránkách firmy Agilent, umožňující přenést i celkový obsah paměti (2,5 miliónu měřených hodnot). Jeho velkou nevýhodou je možnost přenosu dat mezi osciloskopem a počítačem pouze přes sériovou linku RS232 (jiná přenosová linka není k dispozici). Tato linka by i při plné maximální dostupné přenosové rychlosti 57600 Baudů přenášela

2,5 milionů dat přibližně 30 minut (tento údaj byl získán informativním výpisem programu Intuilink). Za další nevýhodu tohoto řešení bych označil velkou velikost získaného souboru s daty a tím komplikované zpracování a přenos těchto velkých datových souborů.

- Pomocí funkce „MegaZoom“ používaného osciloskopu lze při jednorázovém měření zvětšovat naměřený průběh a následně pomocí makra Agilent Excel 54600 toolbar v programu Microsoft Excel přenést libovolně zvětšený průběh do počítače ke zpracování (přenos přibližně 10 s, velikost datového souboru 220kB).

Po zvážení obou možností byl zvolen druhý způsob a to hlavně pro časovou náročnost kladenou na přenos dat jednoho měření vzhledem k velkému počtu měření.

Pro měření sdružených napětí za frekvenčním měničem byla používána funkce osciloskopu „MegaZoom“ a byly zaznamenávány následující průběhy:

- Průběh minimálně jedné periody sdruženého napětí
- Detail průběhu – kladná půlvlna periody sdruženého napětí
- Detail pulzu kladné půlvlny periody sdruženého napětí

Dále bylo zjišťováno chování pohonu při různém uspořádání vstupního filtru, měniče frekvence, filtrační tlumivky a asynchronního motoru při těchto kombinacích zapojení:

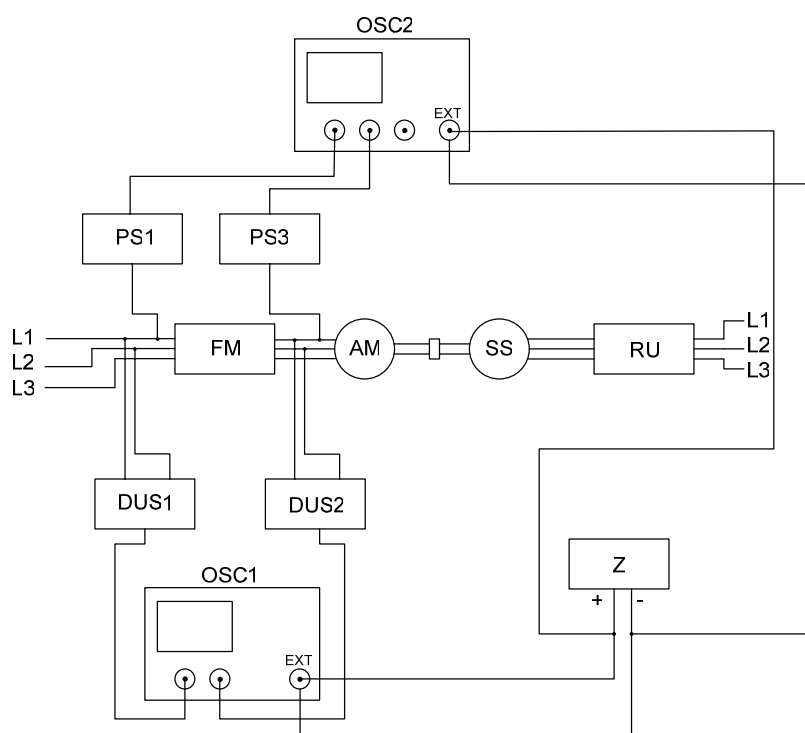
- Frekvenční měnič – Asynchronní motor
- Vstupní filtr – Frekvenční měnič – Asynchronní motor
- Frekvenční měnič – Filtrační tlumivka – Asynchronní motor
- Vstupní filtr – Frekvenční měnič – Filtrační tlumivka – Asynchronní motor

7.1.1. Frekvenční měnič – Asynchronní motor

7.1.1.1. Schéma zapojení, podmínky měření

Na frekvenčním měniči FM byly nastavovány hodnoty modulační frekvence f_{mod} : 2, 8, 16 kHz a f_{nap} : 25, 50 Hz. Tyto hodnoty byly nastaveny na FM pod parametrem P761 (nastavení modulační frekvence v rozsahu 1,5 až 16 kHz). Frekvence výstupního napětí měniče byla nastavena pomocí potenciometru připojeného na analogový vstup měniče (potenciometr je umístěn na ovládacím panelu FM).

Pomocí digitálních osciloskopů OSC1, OSC2 a napěťových a klešťových proudových sond byly zaznamenány průběhy příslušných proudů a napětí. Osciloskopy byly spouštěny pomocí externího pulzu o velikosti 12 V vytvářeného stejnosměrným zdrojem Z, viz obr. 13.



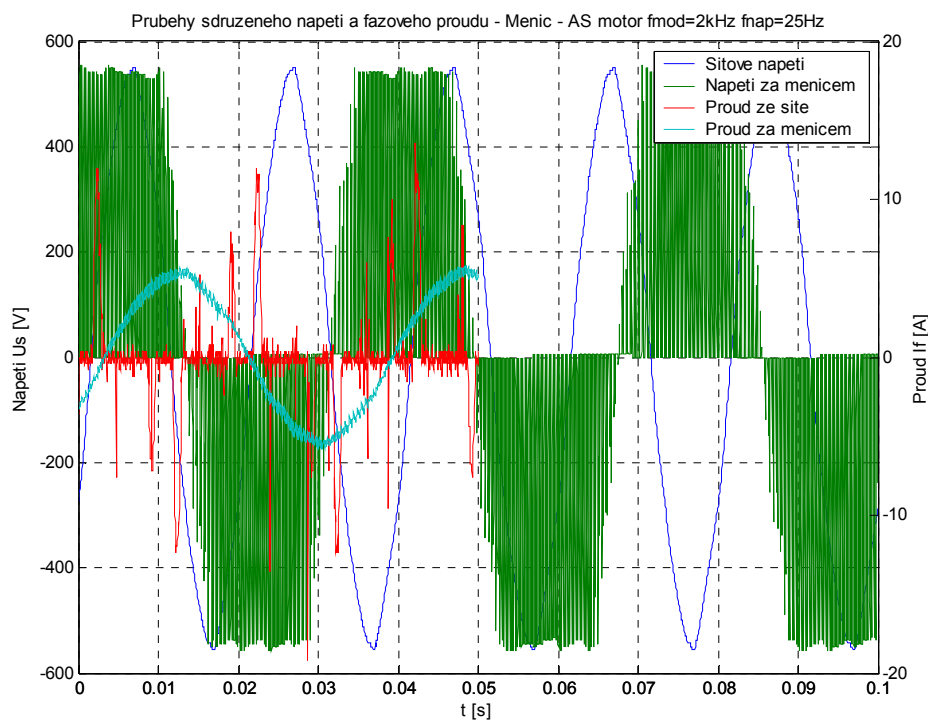
Obr. 13 Schéma zapojení pro uspořádání FM – AS

7.1.1.2. Změřené průběhy proudů a napětí

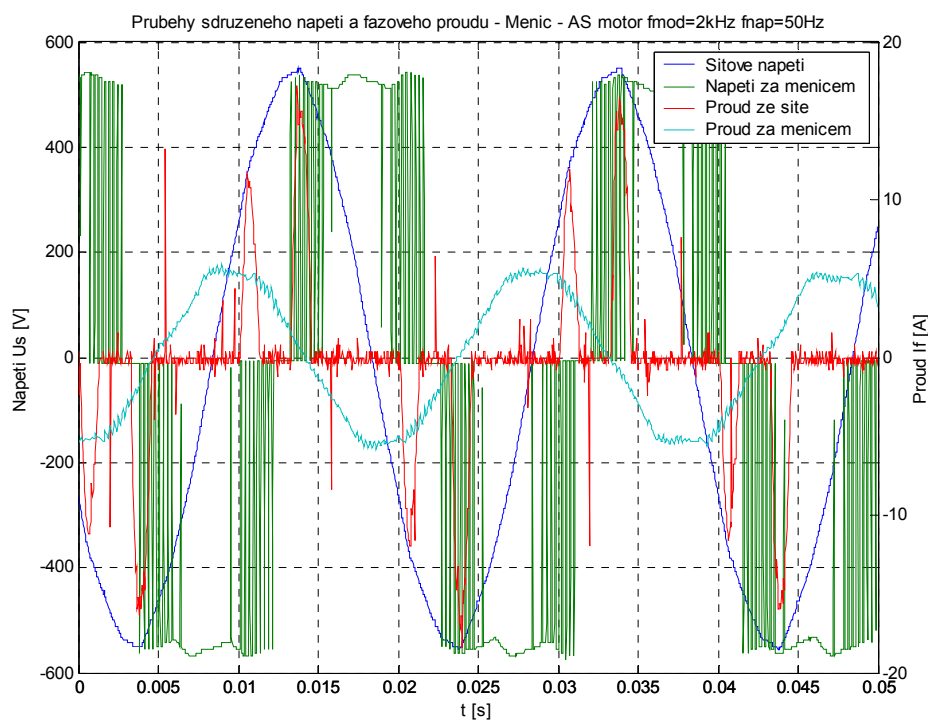
Při připojení asynchronního motoru AM k napájecí síti pouze přes frekvenční měnič FM nebylo měřeno tolik průběhů napětí jako v ostatních zapojeních a proto bylo v tomto případě zvoleno zobrazení proudů a sdružených napětí do jednoho grafu. Také byl v tomto případě zobrazen do grafu detail průběhu kladné půlperiody proudu, pro demonstraci průběhu proudu při pulzně šířkové modulaci.

a)

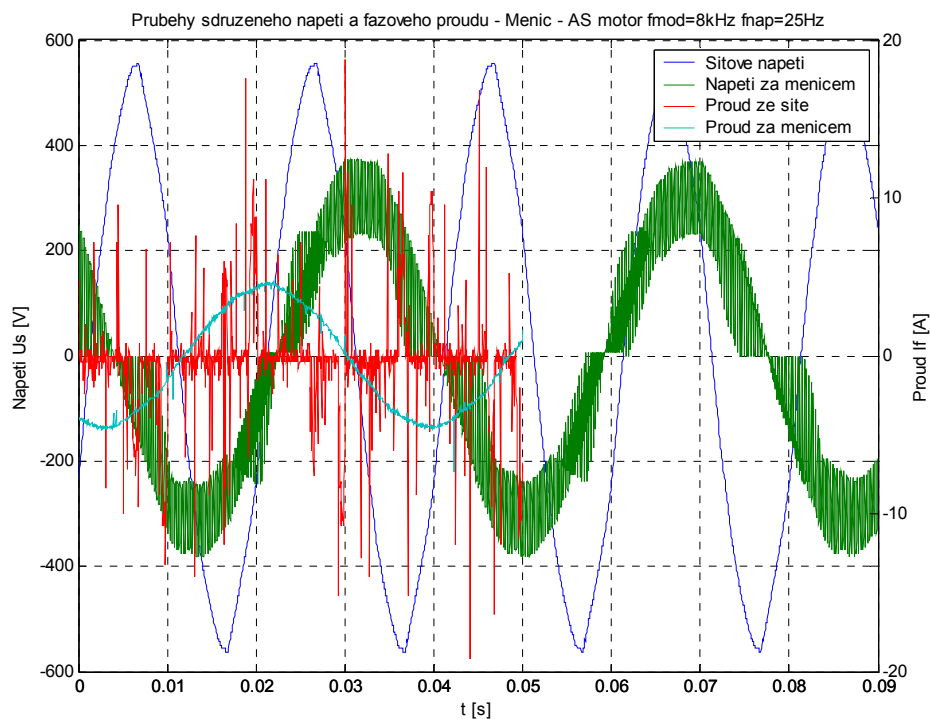
Změřené průběhy proudů a napětí při nastavení: $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25$ a 50 Hz



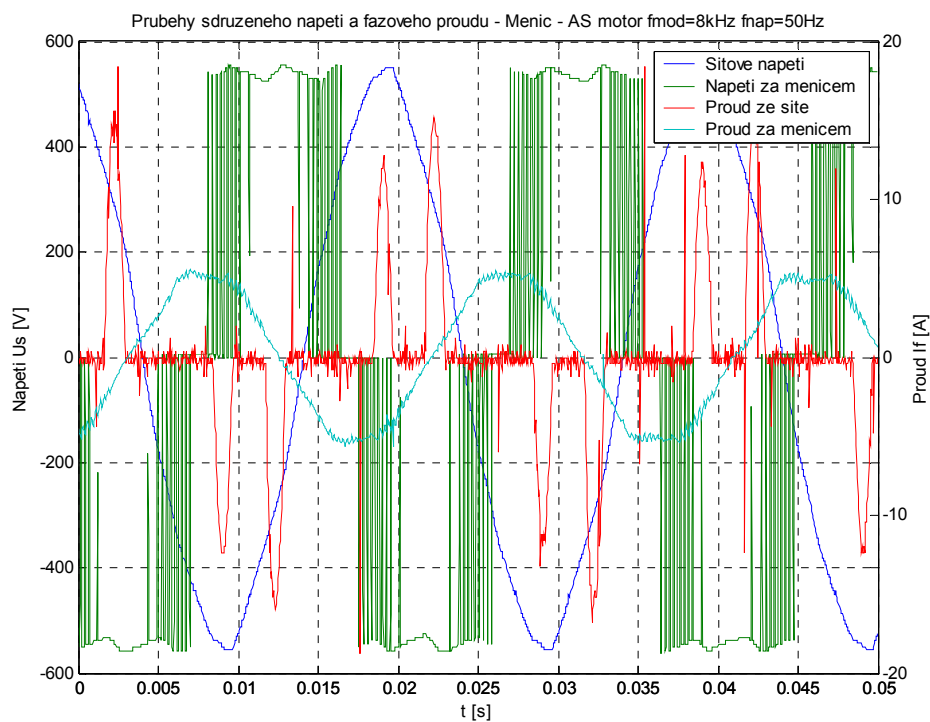
Graf č. 1 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



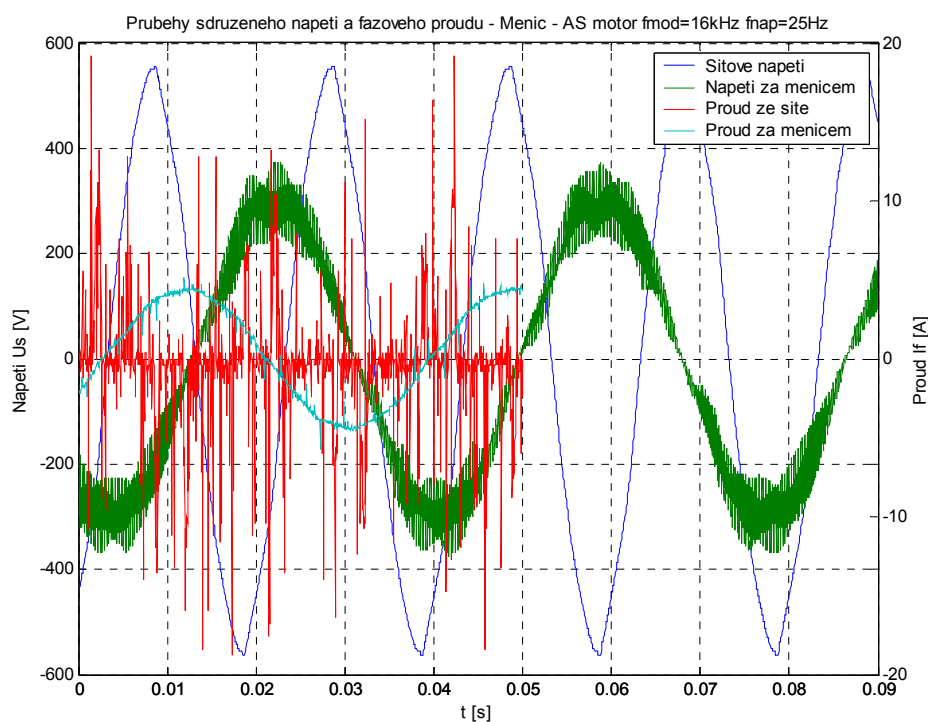
Graf č. 2 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



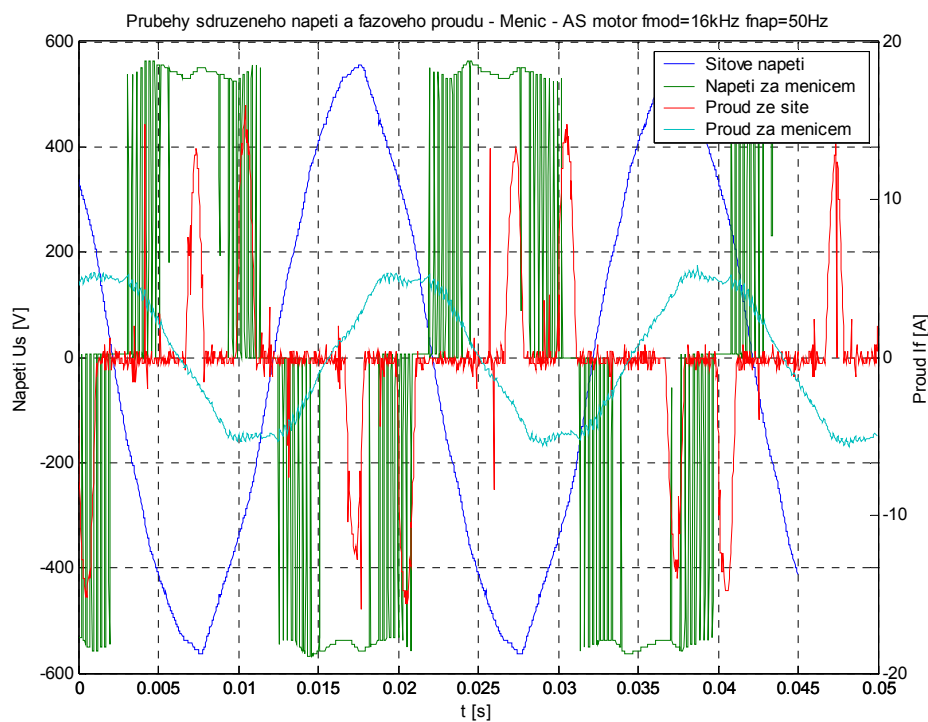
Graf č. 3 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 4 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

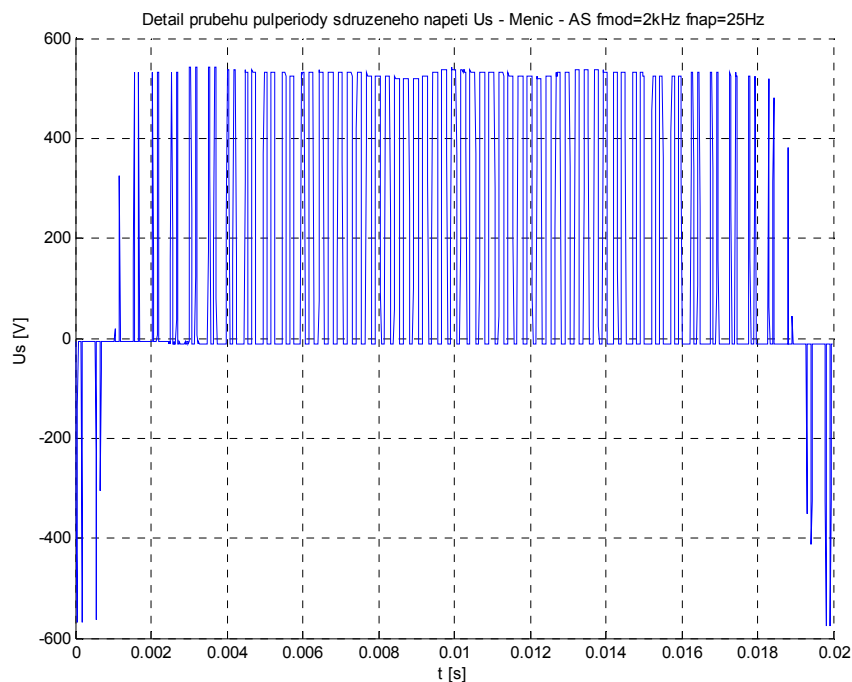


Graf č. 5 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$

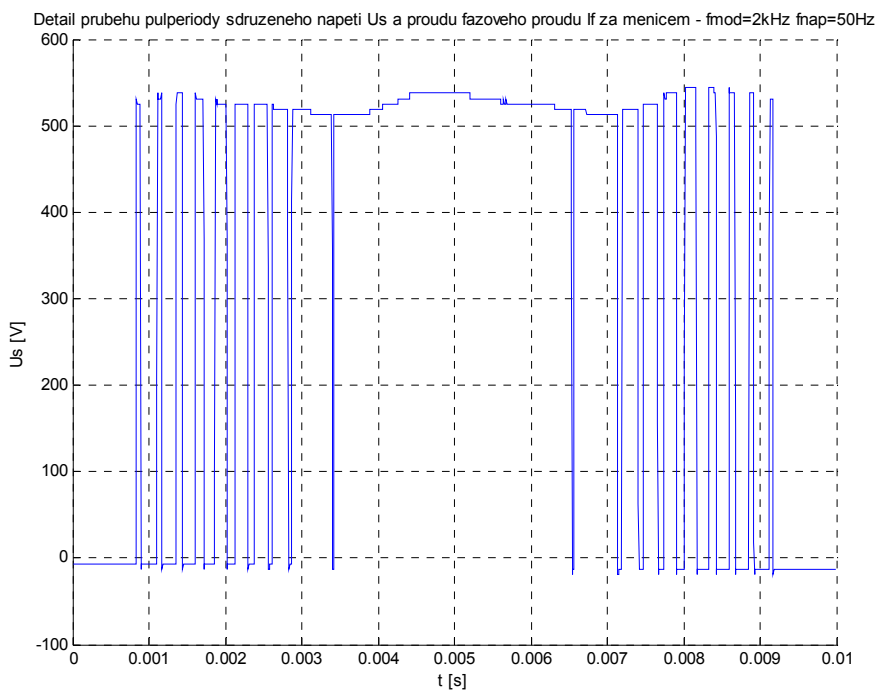


Graf č. 6 Průběhy sdruženého napětí a fázového proudu $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

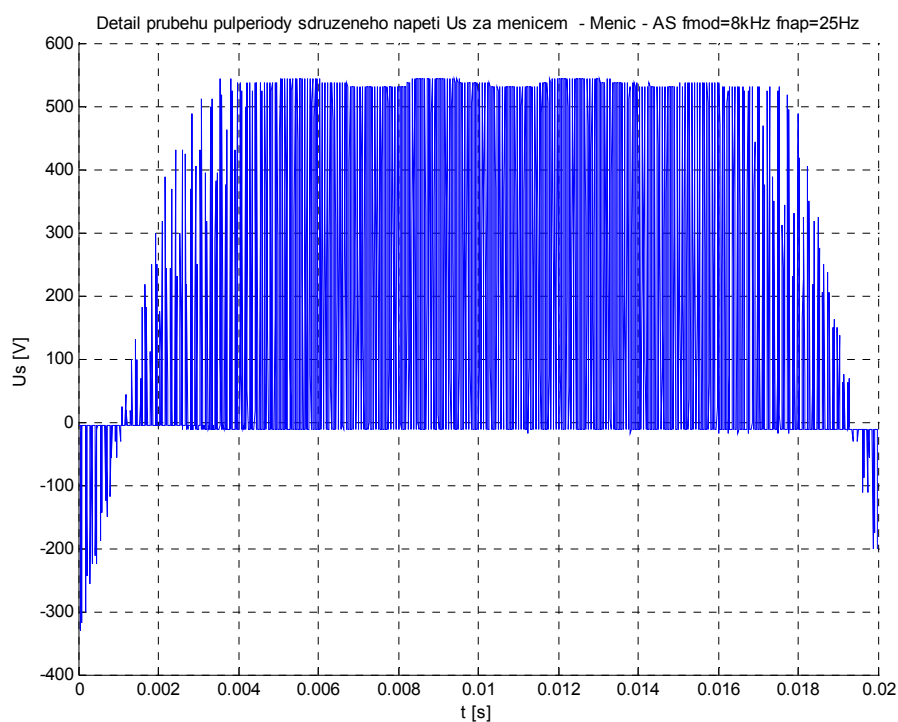
b) Průběhy kladných půlvln sdruženého napětí za frekvenčním měničem při $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16 \text{ kHz}$ a $f_{\text{nap}} = 25 \text{ a } 50 \text{ Hz}$



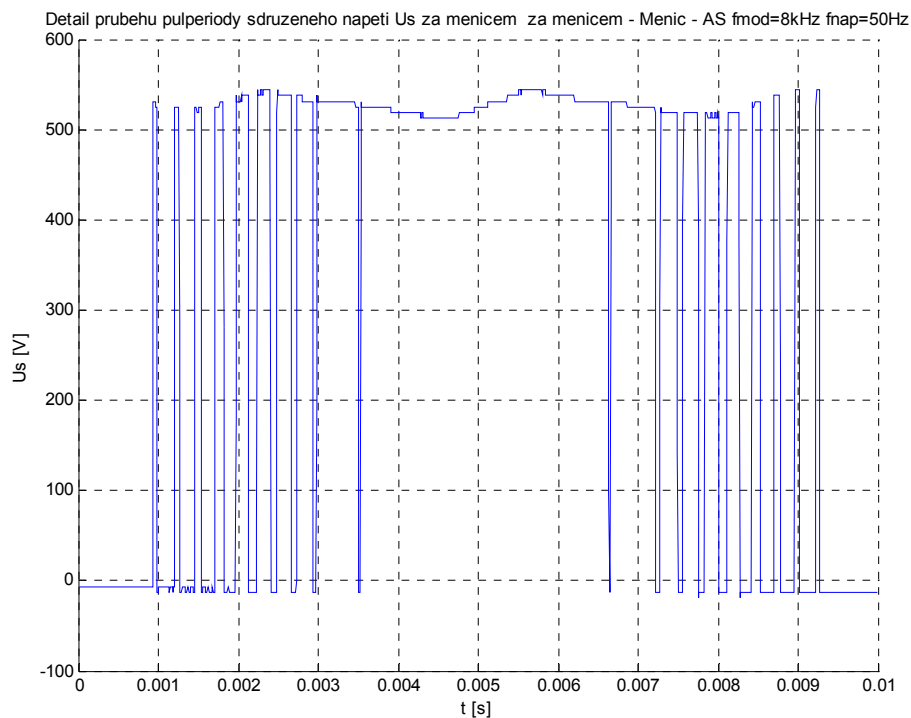
Graf č. 7 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měničem
 $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



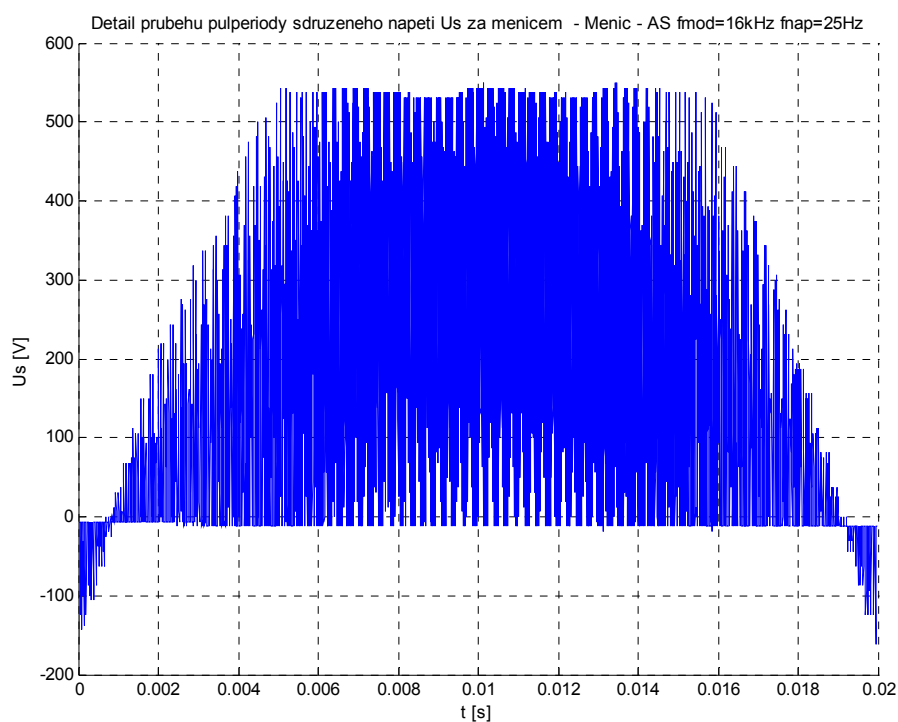
Graf č. 8 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měničem
 $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



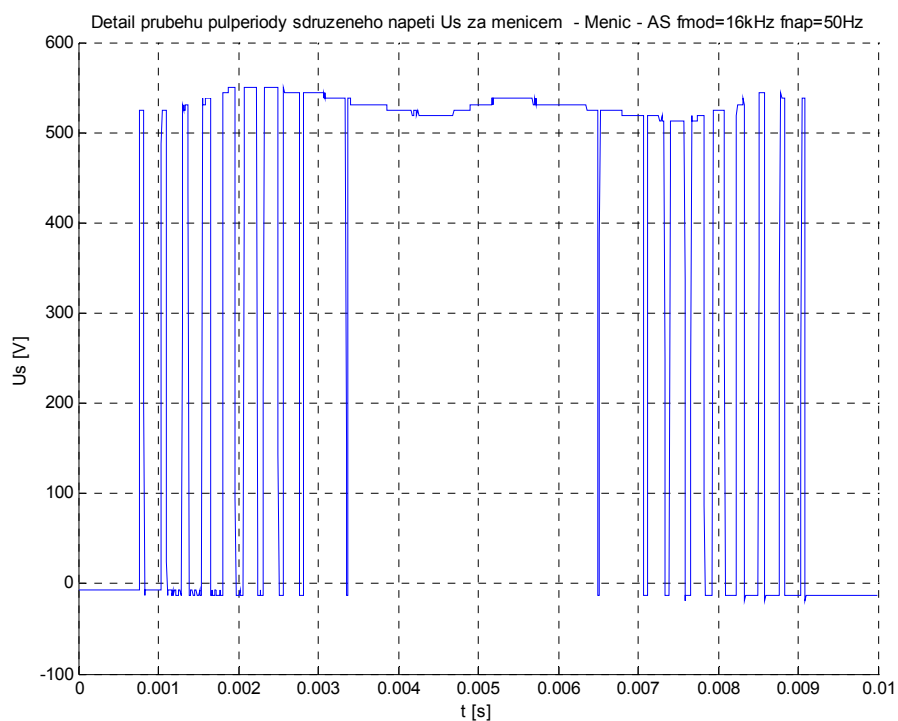
Graf č. 9 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měnicem
 $f_{mod} = 8 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 10 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měnicem
 $f_{mod} = 8 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$

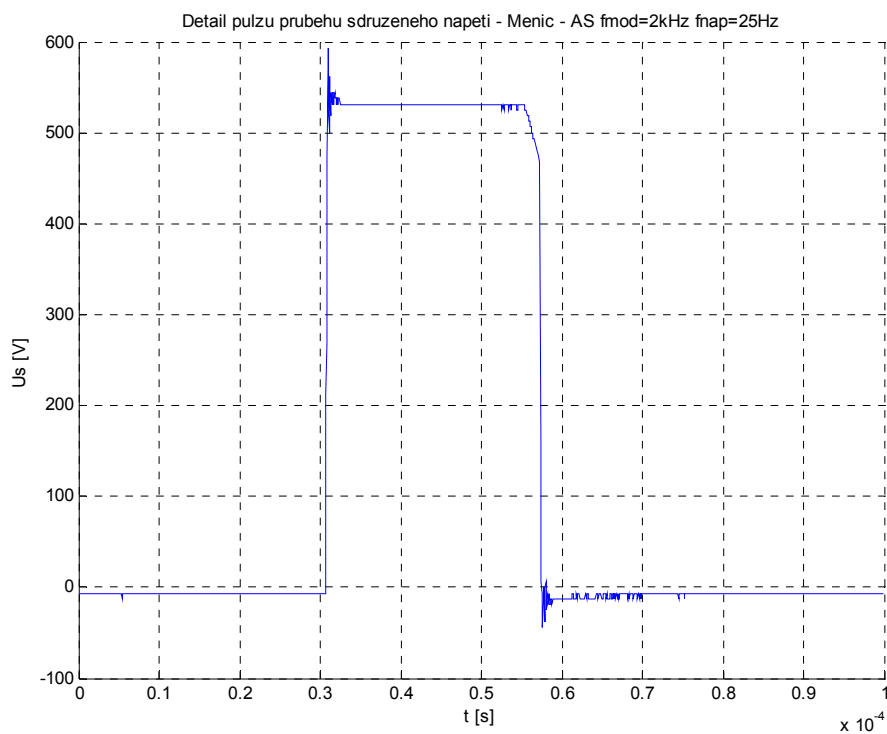


Graf č. 11 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měničem $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$

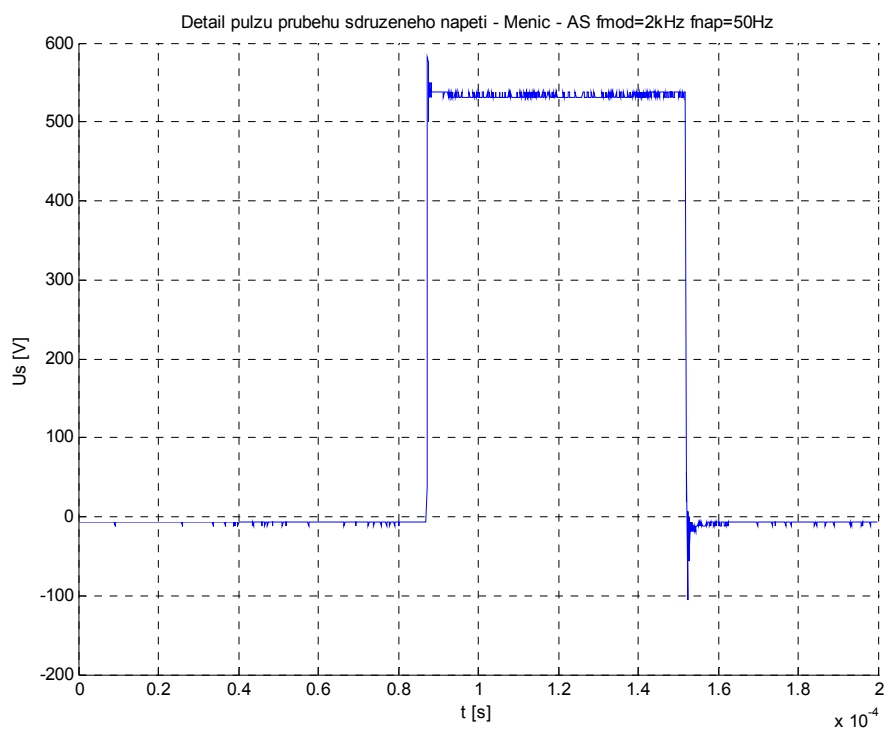


Graf č. 12 Detail průběhu kladné půlvlny sdruženého napětí za měničem $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$

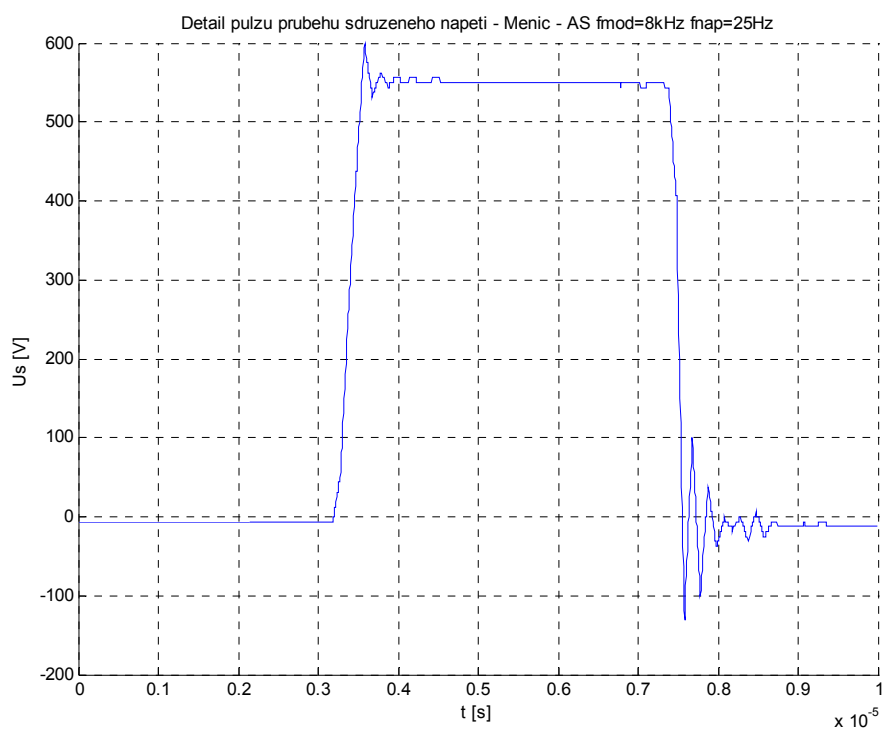
c) Detaily pulzů sdružených napětí za měničem při $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25$ a 50 Hz



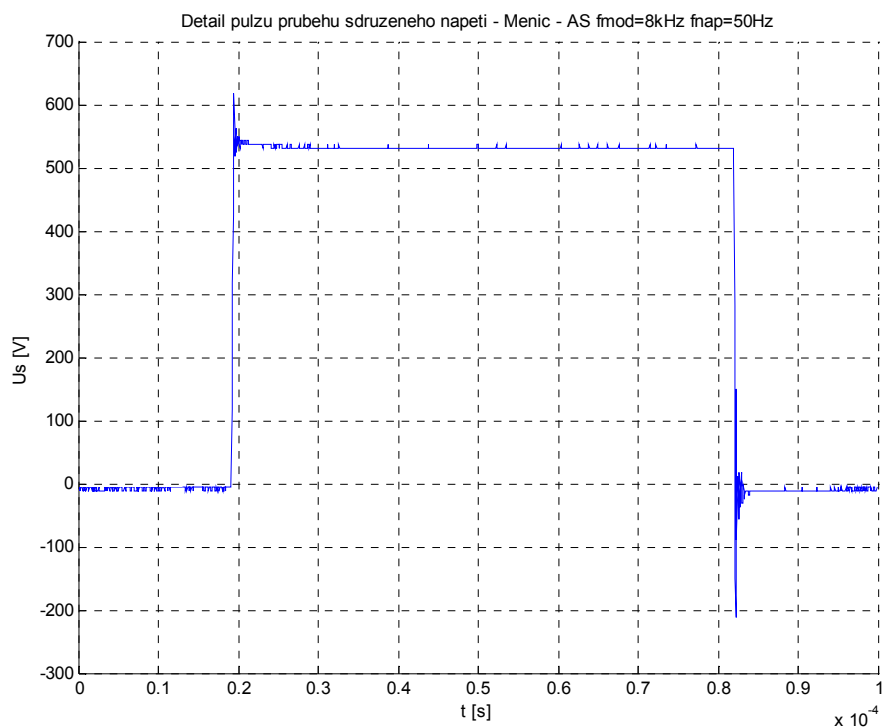
Graf č. 13 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



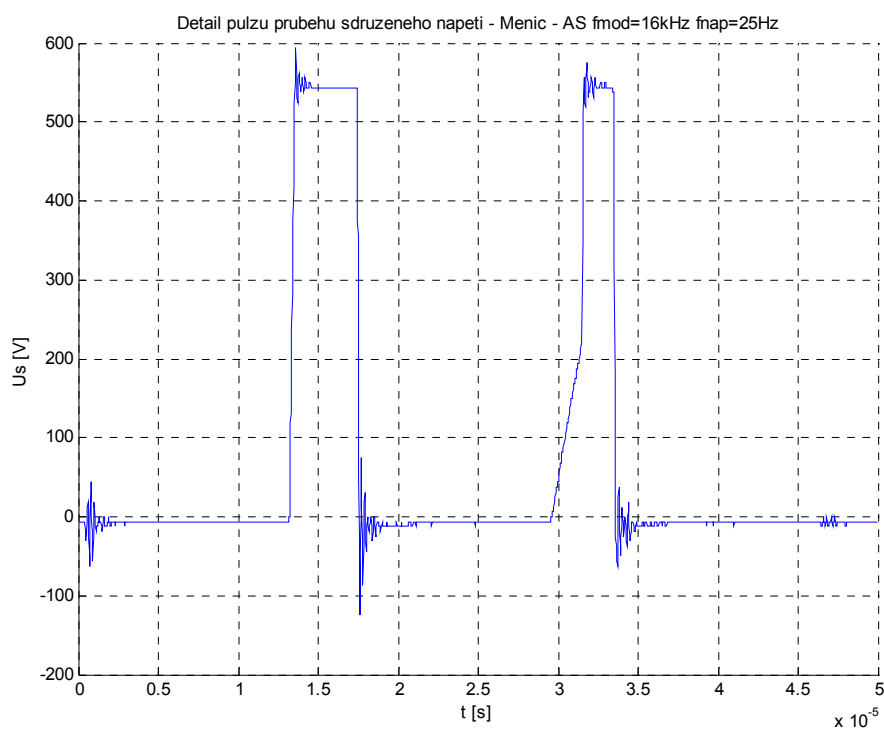
Graf č. 14 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



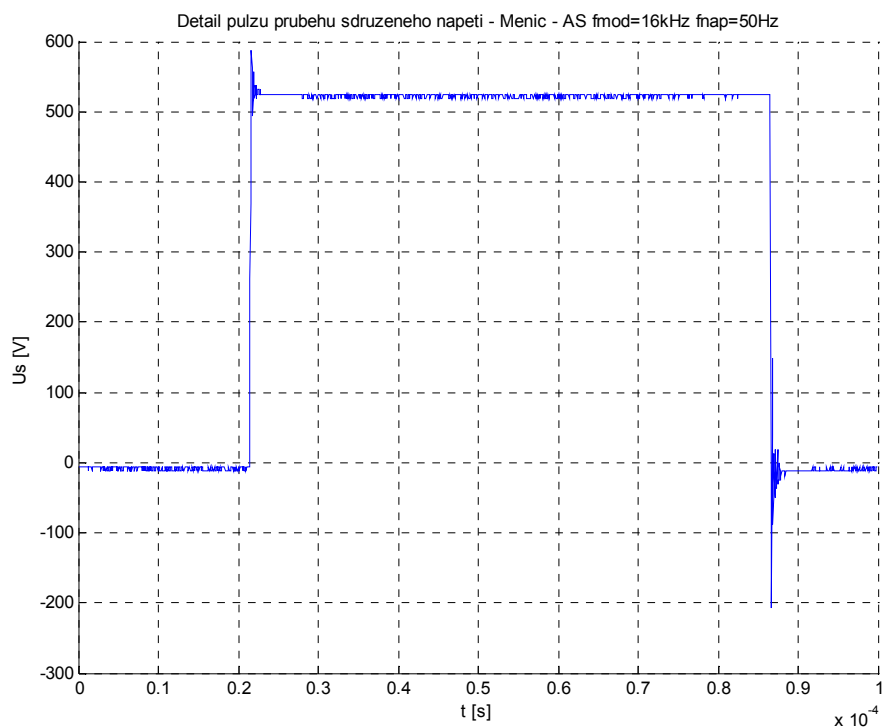
Graf č. 15 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 16 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



Graf č. 17 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$

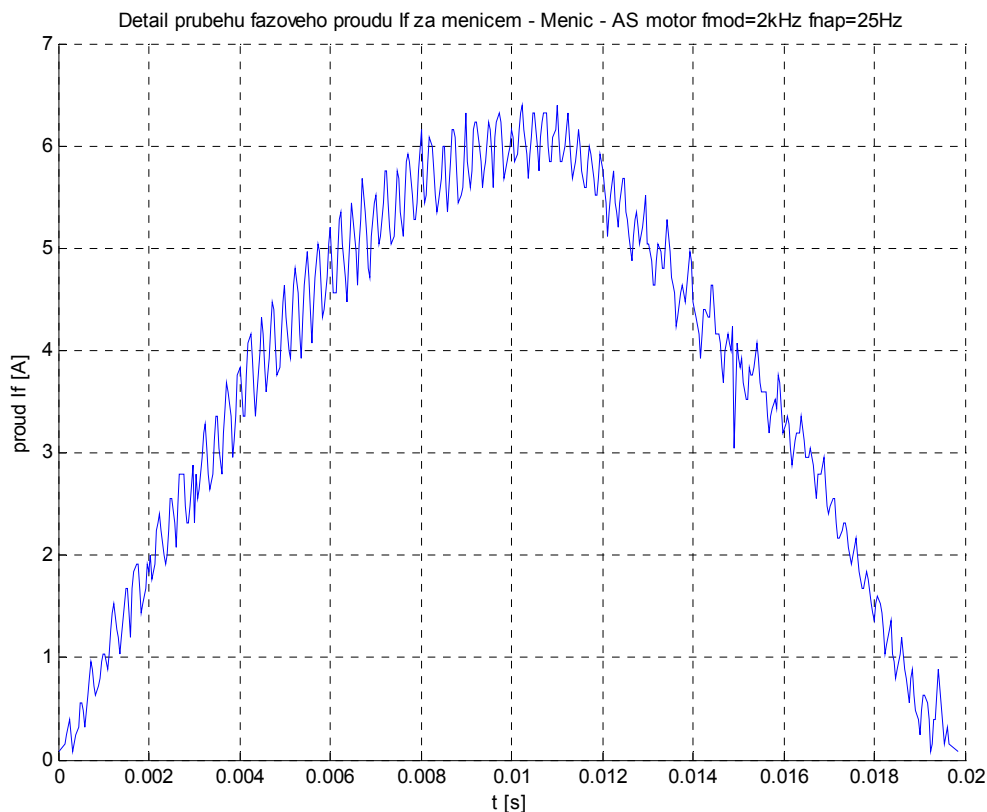


Graf č. 18 Detail pulzu sdruženého napětí za měničem $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

d)

Průběh kladné půlperiody proudu za frekvenčním měničem

Ukázka průběhu proudu po pulzně-šířkové modulaci



Graf č. 19 Detail průběhu fázového proudu za měničem

7.1.1.3. Vyhodnocení uspořádání Měnič – Motor

Ze změřených průběhů sdruženého napětí napájecí sítě a po průchodu frekvenčním měničem je patrné, že frekvenční měnič přetváří síťové sinusové napětí na napětí složené z obdélníkových pulzů, viz 7.1.3.2 a). Se zvyšující se modulační frekvencí roste počet sepnutí a tedy i hustota pulzů na periodu výstupního průběhu napětí, viz 7.1.1.2 b). Poměrem doby sepnutí a odepnutí se řídí střední hodnota jednotlivých pulzů a vytváří přibližně sinusový průběh. S rostoucí modulační frekvencí dochází k rychlejšímu spínání a odpínání, což se projeví na tvaru jednotlivých pulzů, viz 7.1.1.2 c). Fázový posun mezi napětím sítě a napětím za frekvenčním měničem, se neustále mění. Důvodem je nedokonalá regulace frekvence výstupního napětí, která kolísá v desetinách hertzů kolem

požadované hodnoty. Proto nelze určit, zda jsou tato napětí ve fázi, či je jejich fáze vzájemně posunutá.

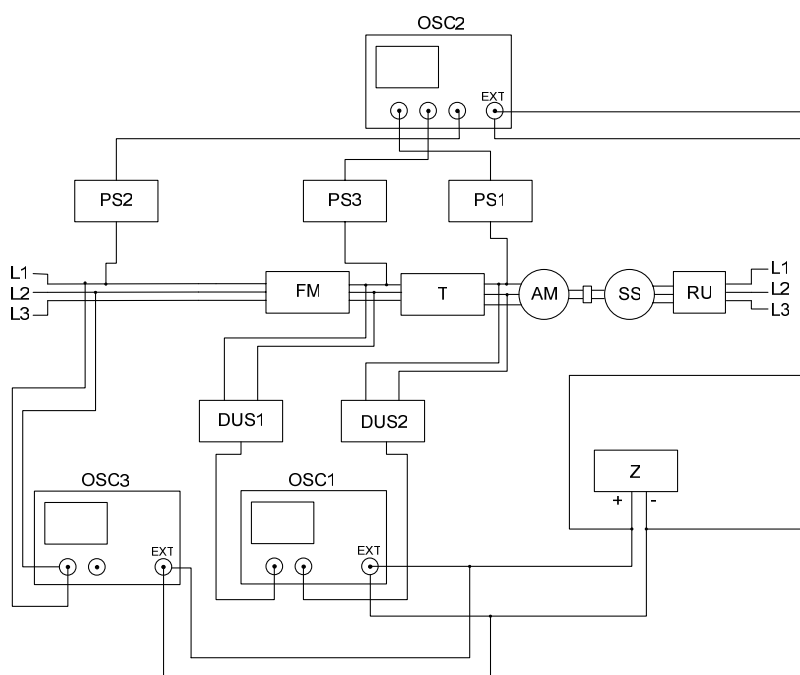
Proud odebíraný ze sítě má tvar dvou pulzů o amplitudě až 15 A, což je typické pro odběr proudu usměrňovačem, viz 7.1.1.2 a). Šířkově pulzní modulací používanou frekvenčním měničem získáme průběh proudu přibližně sinusového tvaru viz 7.1.1.2 d). Efektivní hodnota tohoto proudu (3,8 A) odpovídá proudu při jmenovitém zatížení motoru .

Fázový posun mezi proudem a napětím za měničem závisí na typu zátěže a typu regulace. Pro tuto kombinaci je proud fázově posunut o 90° před napětím, viz 7.1.1.2 a).

7.1.2. Frekvenční měnič – Filtrační tlumivka – Asynchronní motor

7.1.2.1. Schéma zapojení, podmínky měření

Modulační frekvence byla nastavena na frekvenčním měniči FM na hodnoty $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16$ kHz a napájecí frekvence asynchronního motoru AM na hodnoty $f_{\text{nap}} = 25$ a 50 Hz. Mezi FM a AM byla zapojena filtrační tlumivka F a zaznamenány průběhy napětí a proudů po průchodu touto tlumivku, viz obr. 14.

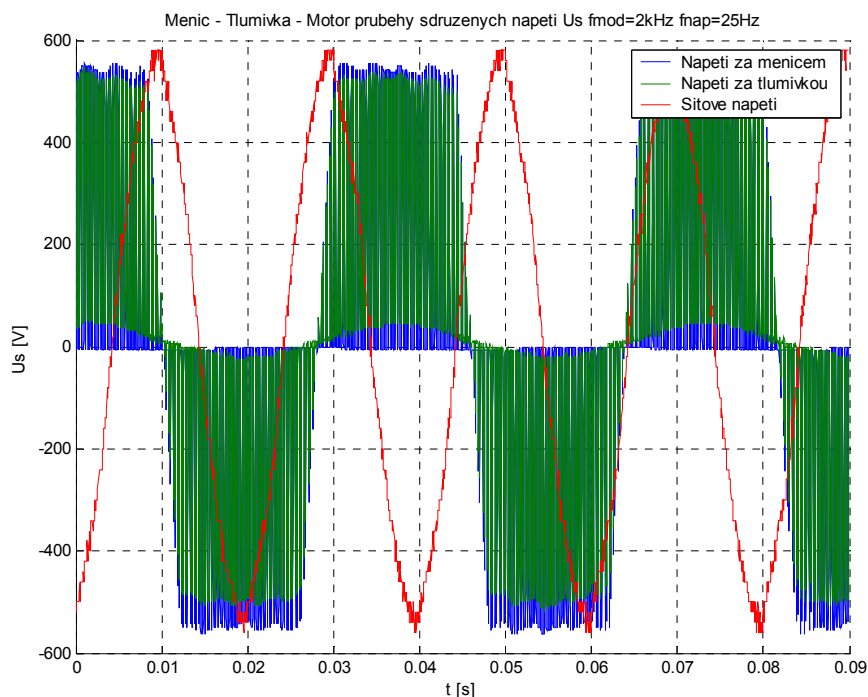


Obr. 14 Schéma zapojení pro uspořádání FM-T-AM

7.1.2.2. Změřené průběhy proudů a napětí:

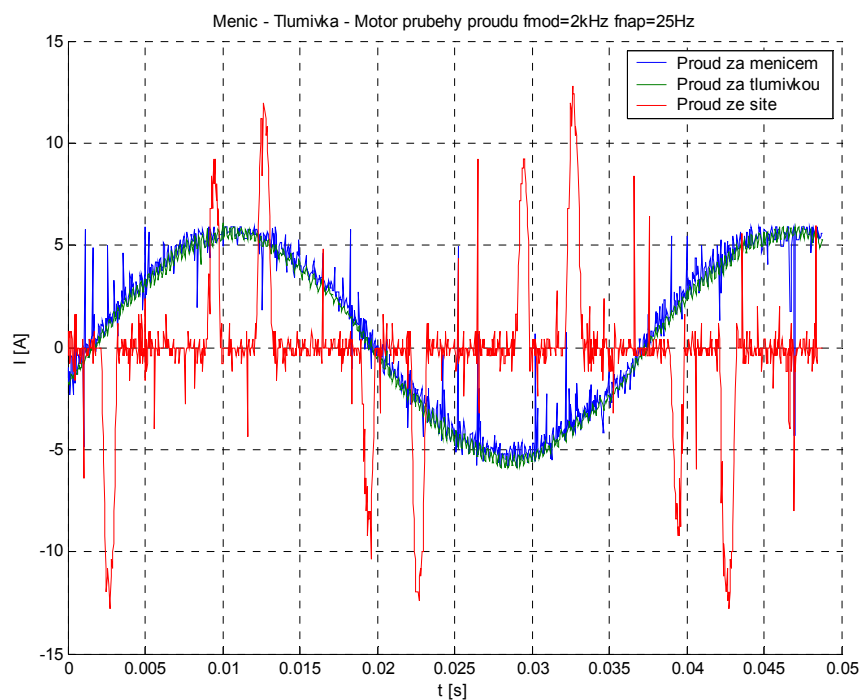
Průběhy sdružených napětí a proudů byly odměřeny pro všechny kombinace modulační a napájecí frekvence. Průběhy několika period těchto veličin mají obdobné průběhy jako v případě FM-AM, viz 7.1.1.2 a). Proto byla pro porovnání uvedena pouze kombinace $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$. Ostatní grafy jsou zařazeny v příloze č. 2.

a) Průběhy sdružených napětí:

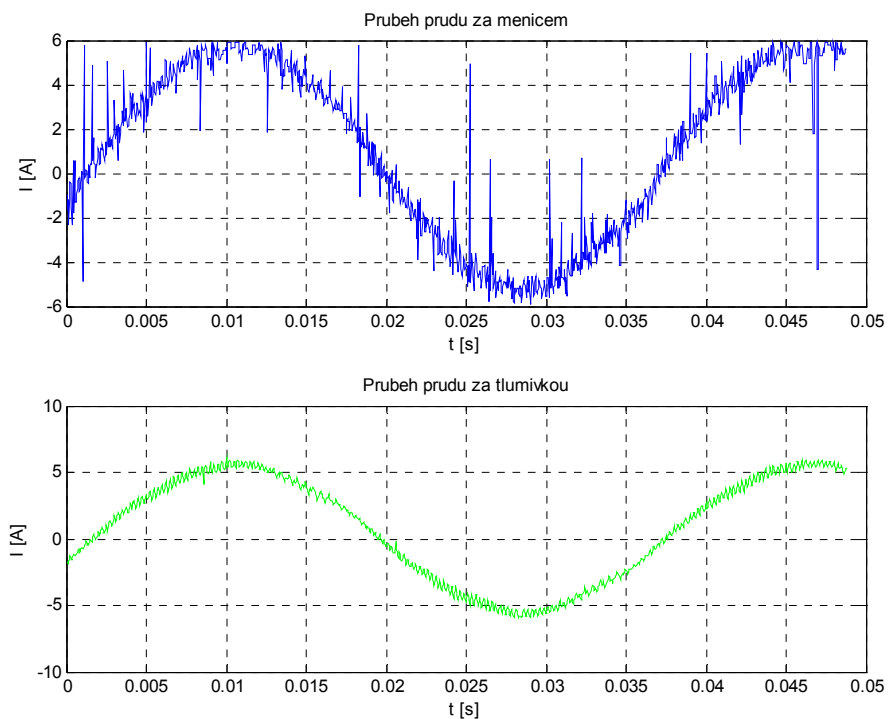


Graf č. 20 Průběhy sdruženého napětí v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$

b) Průběhy proudů:

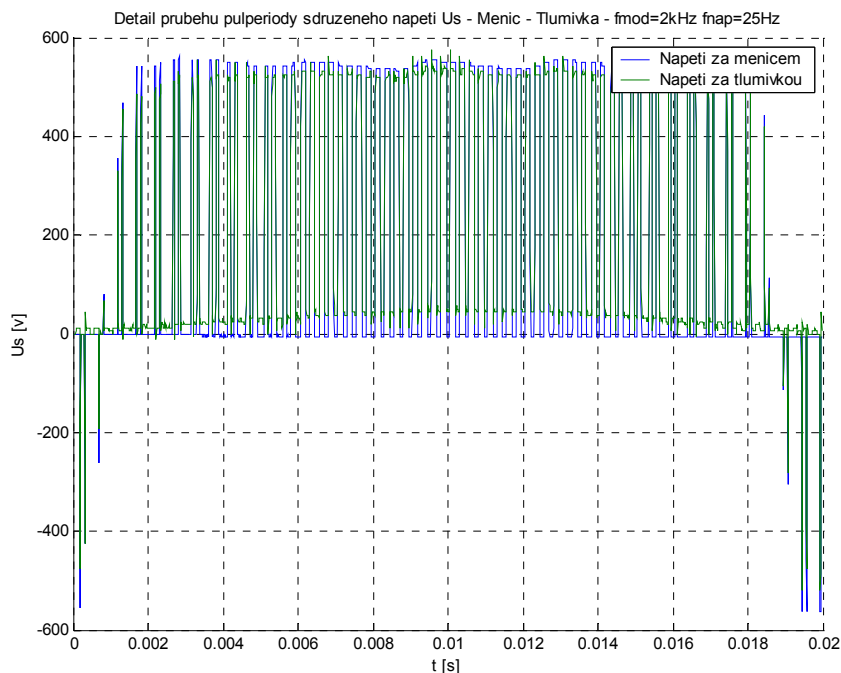


Graf č. 21 Průběhy proudů v zapojení M-T-AM $f_{mod} = 2 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



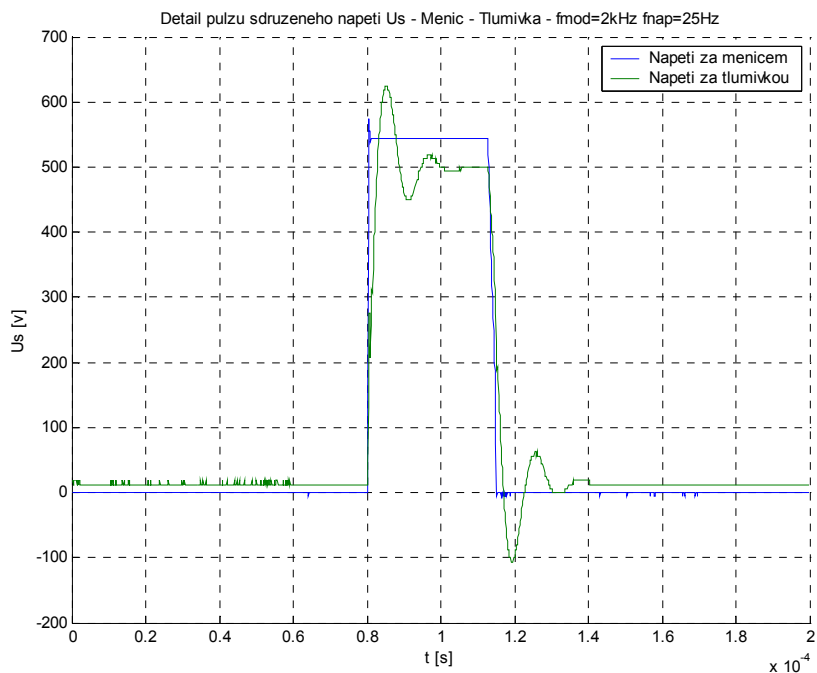
Graf č. 22 Průběh proudů za měničem a za tlumivkou detail

c) Průběhy kladných půlvln sdruženého napětí za frekvenčním měničem a za tlumivkou při $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16 \text{ kHz}$ a $f_{\text{nap}} = 25 \text{ a } 50 \text{ Hz}$

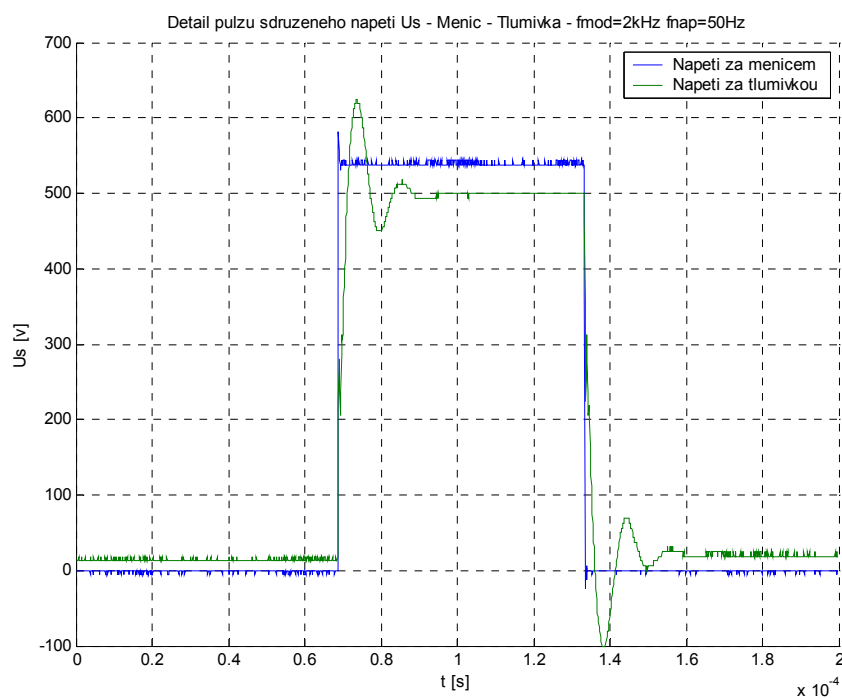


Graf č. 23 Průběhy kladné půlperiody sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM
 $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$

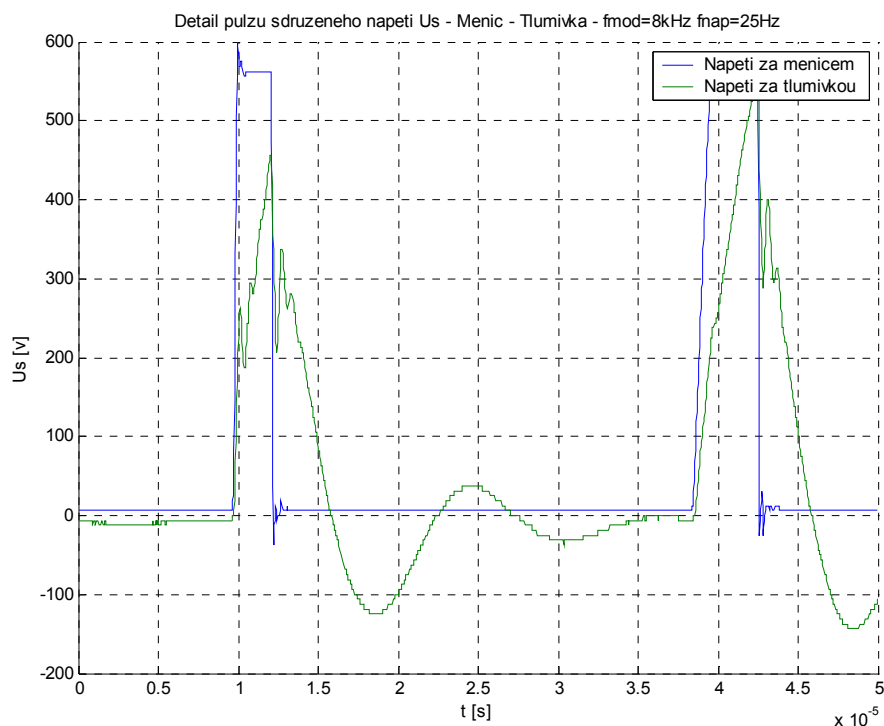
d) Detaily pulzů kladných půlvln sdružených napětí



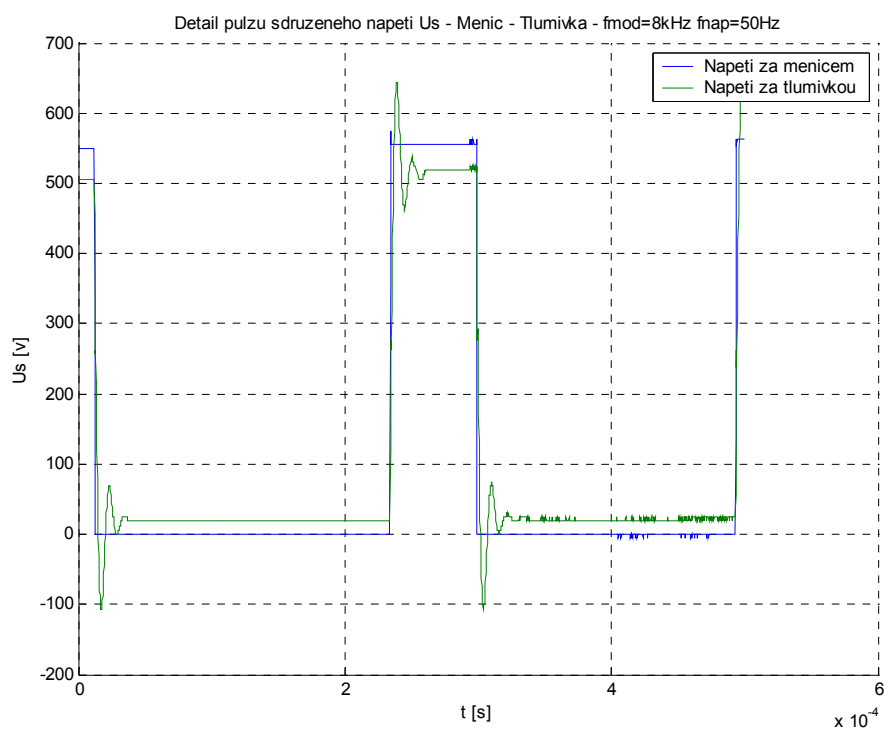
Graf č. 24 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



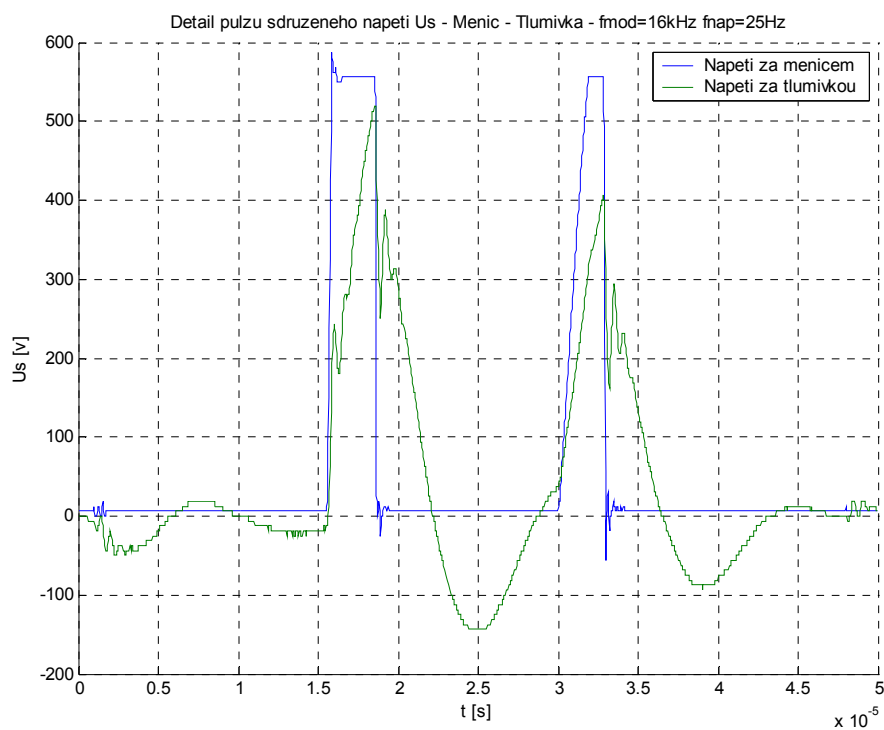
Graf č. 25 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



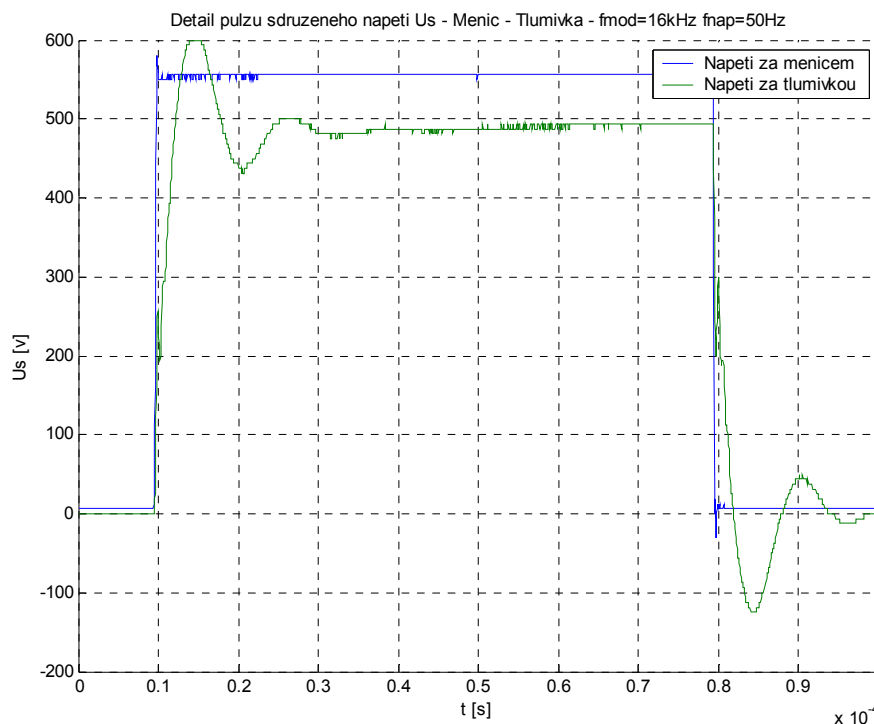
Graf č. 26 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 27 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



Graf č. 28 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 29 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

7.1.2.3. Vyhodnocení uspořádání Měnič – Tlumivka – Motor

Zařazením filtrační tlumivky za frekvenční měnič dochází k úbytku jmenovitého sdruženého napětí, viz 7.1.2.2 a). Zde je uveden pouze graf pro $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$ a $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$, který toto zjištění reprezentuje. Ostatní grafy jsou uvedeny v příloze č. 2.

Filtrační tlumivka má nepříznivý vliv na tvar pulzů napětí vstupujícího do asynchronního motoru, což je vidět na zobrazení detailů jednotlivých pulzů, viz 7.1.2.2 d). Při změně úrovně napětí pulzu dochází k přechodovému jevu, který je tlumivkou zvýrazňován. Tento vliv je nejpatrnější při požadavku na napájecí frekvenci asynchronního motoru 25 Hz a při modulační frekvenci 16 kHz.

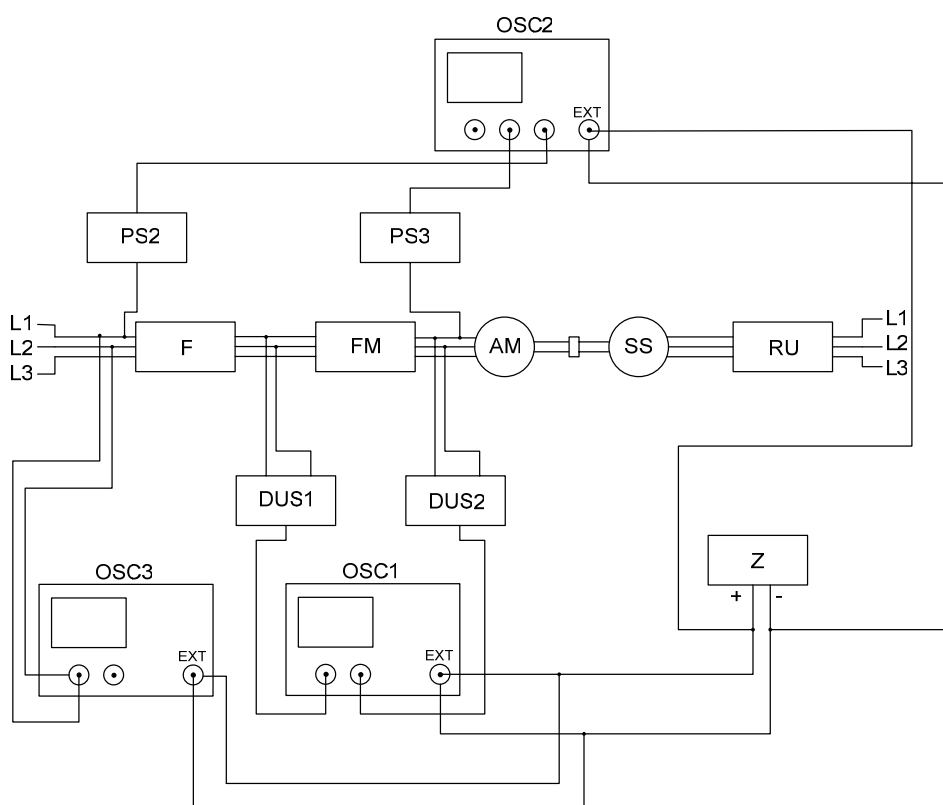
Fázový posun mezi proudem a napětím zůstává jako v předchozí kombinaci FM-T, viz 7.1.2.2 a), b). Proud předbíhá napětí o 90° , viz 7.1.1.

Nejpatrnější je vliv filtrační tlumivky na fázový proud. Průchodem proudu přes tuto tlumivku dochází k vyhlazení proudu, viz graf č. 22.

7.1.3. Vstupní filtr – Měníč frekvence – Asynchronní motor

7.1.3.1. Schéma zapojení, podmínky měření

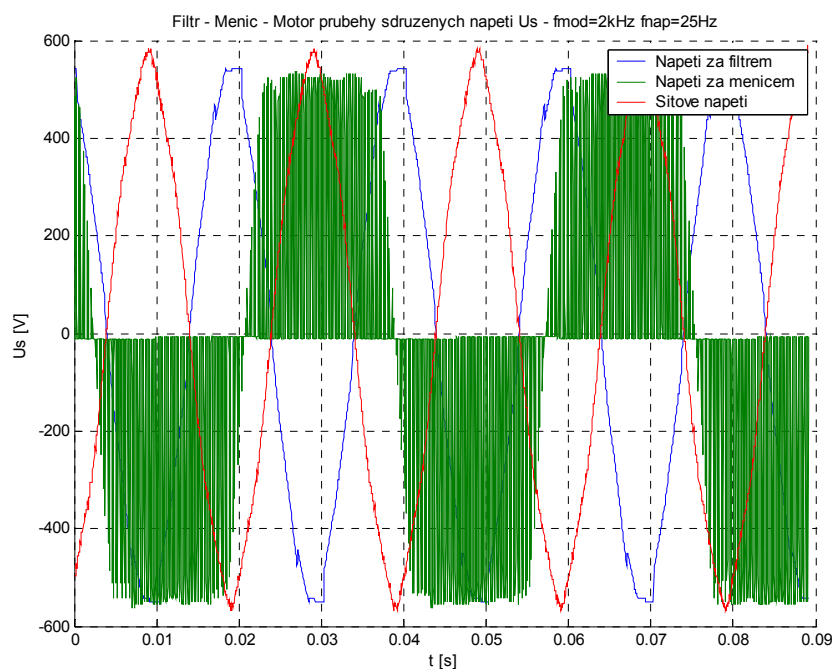
Modulační frekvence byla nastavena na frekvenčním měniči FM na hodnoty $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16 \text{ kHz}$ a napájecí frekvence asynchronního motoru AM na hodnoty $f_{\text{nap}} = 25 \text{ a } 50 \text{ Hz}$. Mezi napájecí sítí a frekvenčním měničem byl zapojen vstupní filtr F a odměřeny průběhy napětí a proudů, viz obr. 15.



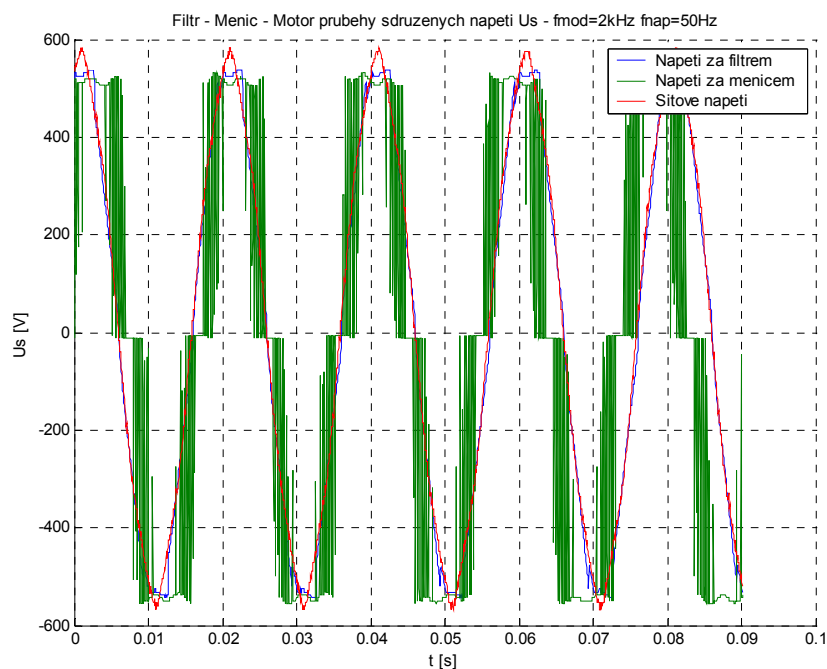
Obr. 15 Schéma zapojení pro uspořádání F - FM - AM

7.1.3.2. Změřené průběhy proudů a napětí

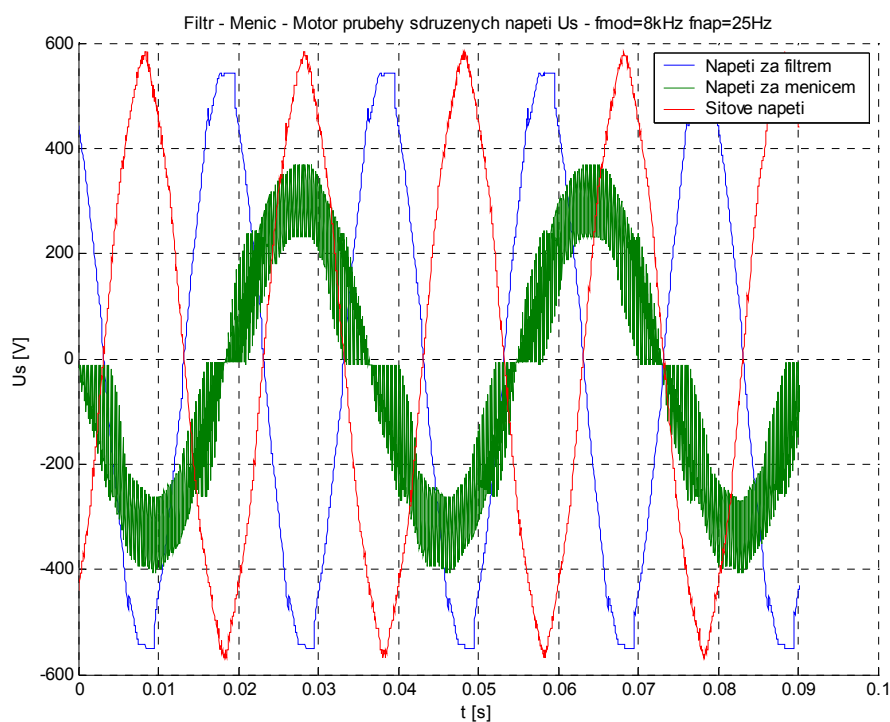
a) Průběhy sdružených napětí v uspořádání F – FM – AM



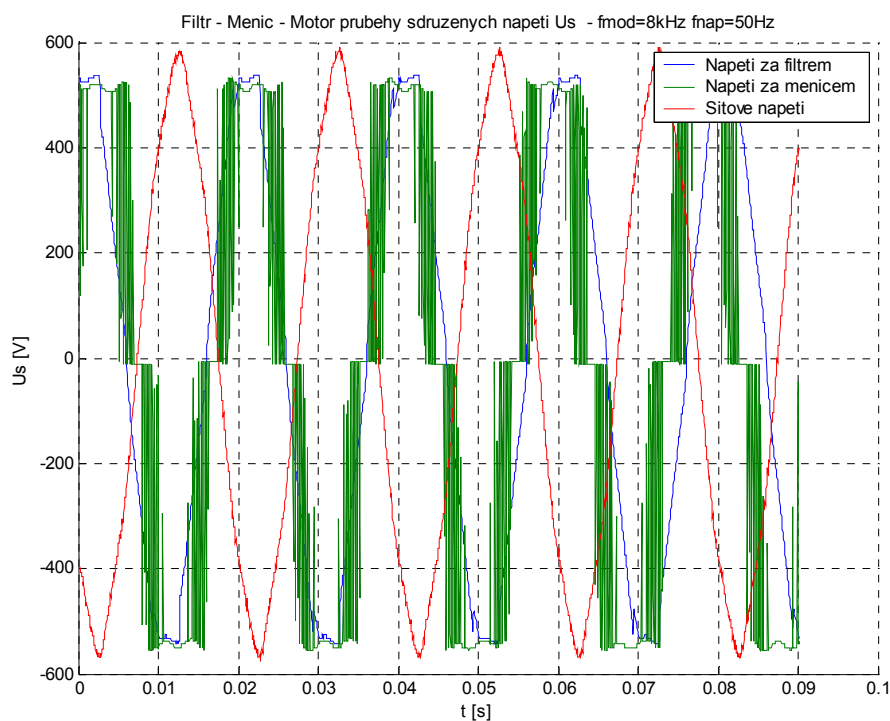
Graf č. 30 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2\text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25\text{ Hz}$



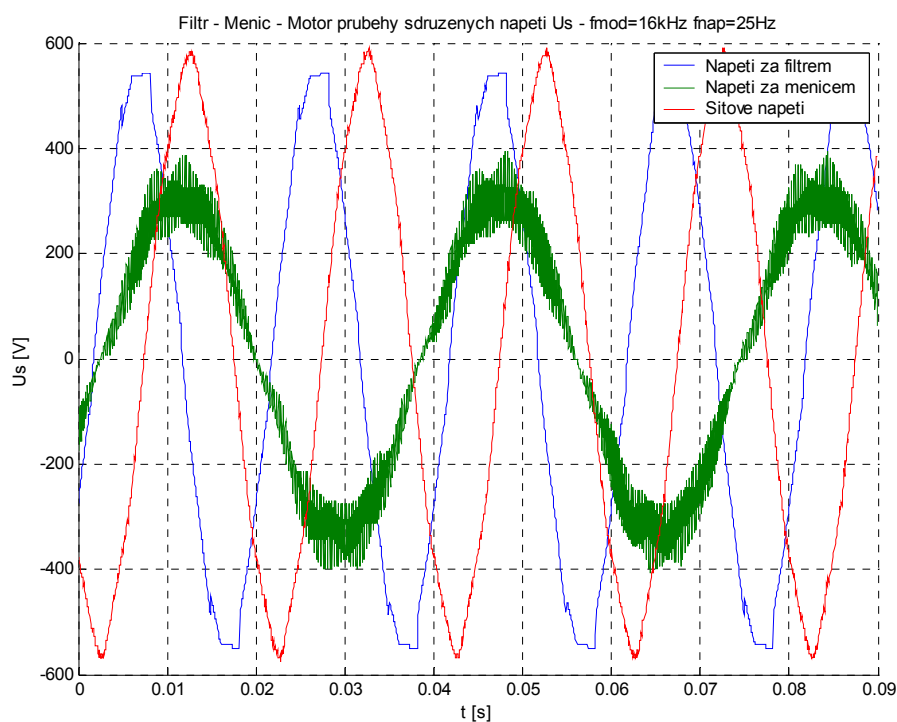
Graf č. 31 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2\text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50\text{ Hz}$



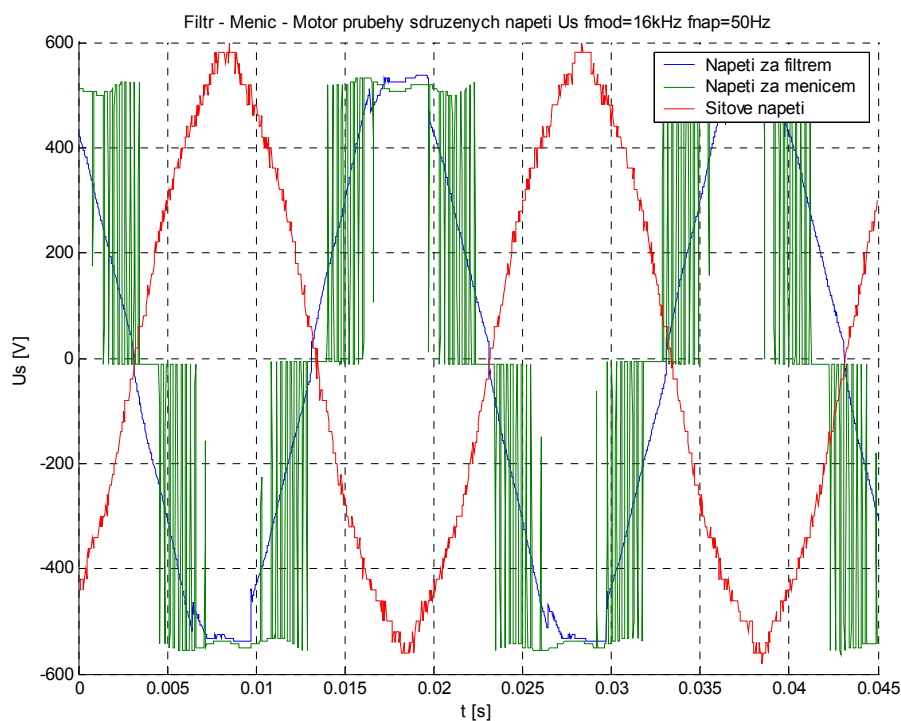
Graf č. 32 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 33 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

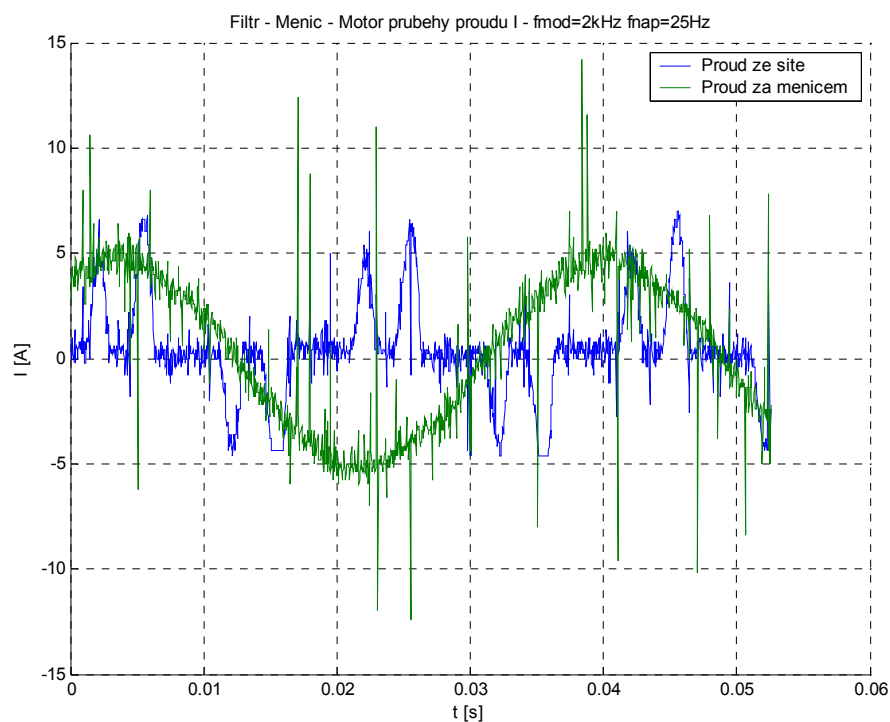


Graf č. 34 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM
 $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$

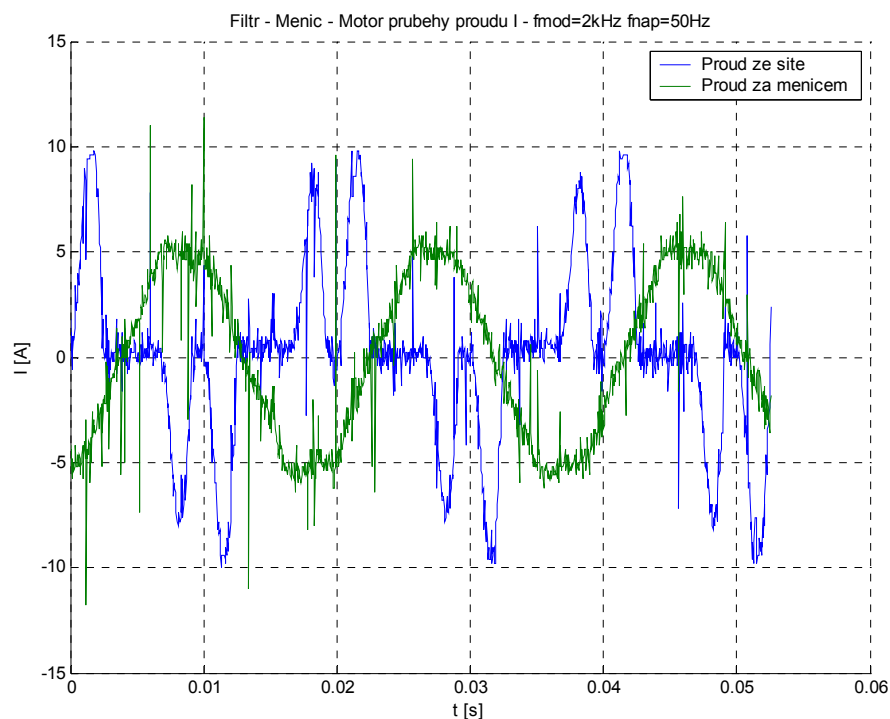


Graf č. 35 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-AM
 $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$

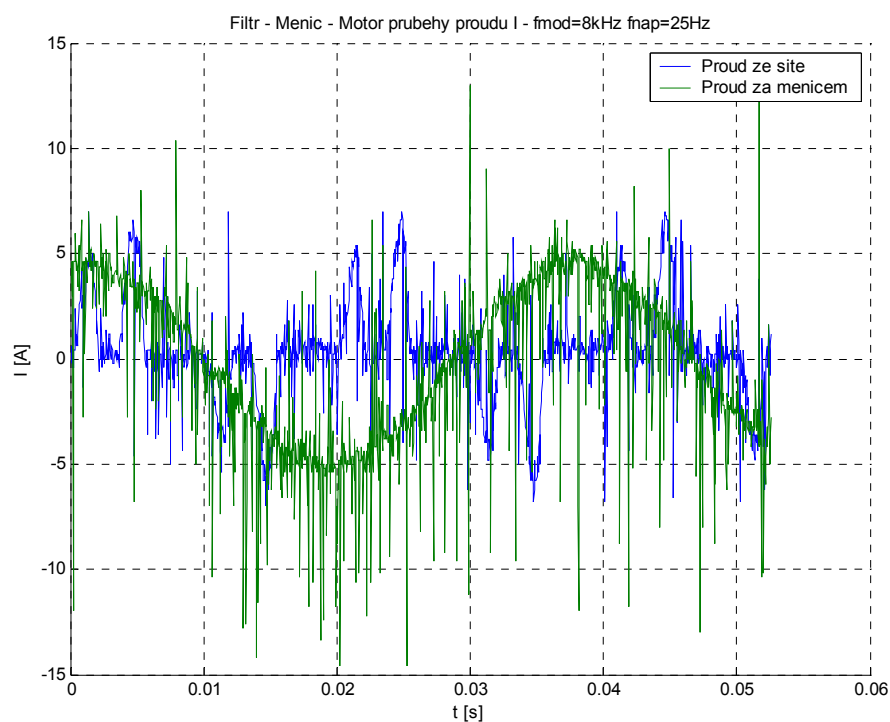
b) Průběhy proudů v uspořádání F – FM – AM



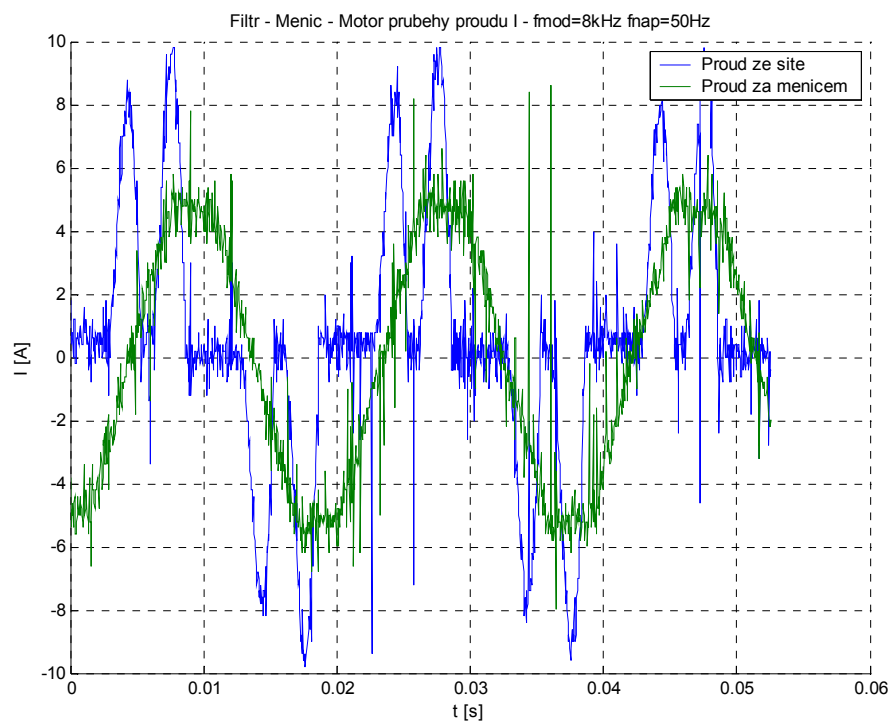
Graf č. 36 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



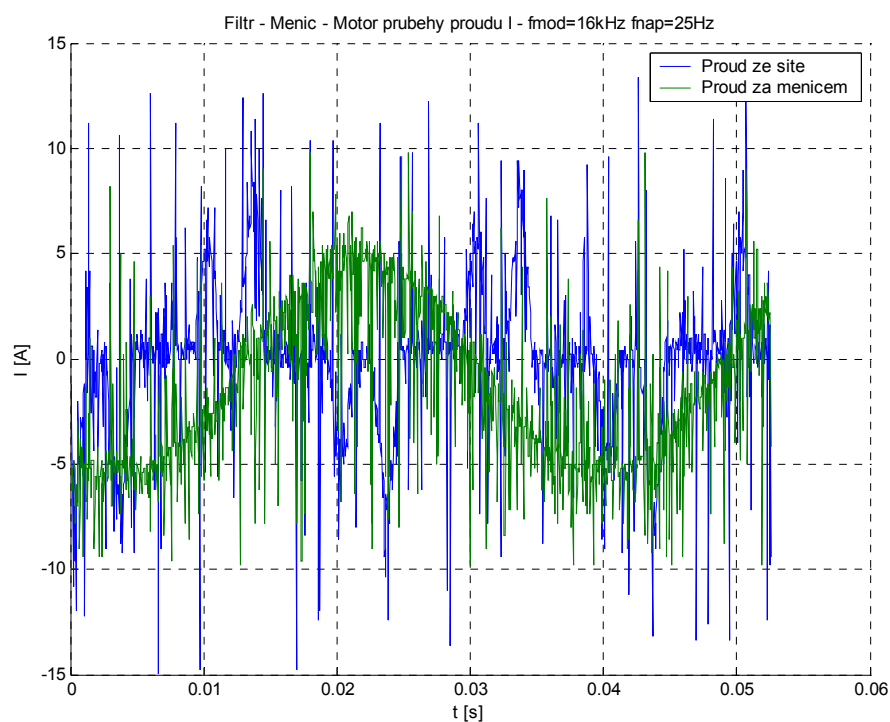
Graf č. 37 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



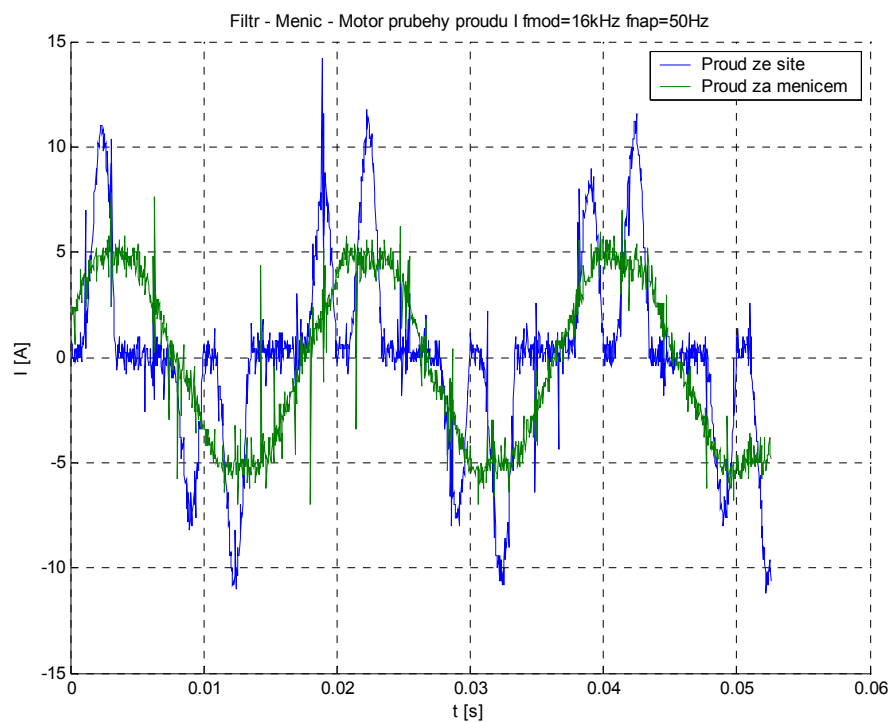
Graf č. 38 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 39 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



Graf č. 40 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 41 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

7.1.3.3. Vyhodnocení uspořádání Filtr – Měnič – Asynchronní motor

V tomto upořádání je pozorován vliv vstupního filtru F na činnost pohonu. Z průběhů, viz 7.1.3.2 a), je patrné otočení fáze a nepatrné zkreslení sinusového průběhu sdruženého napětí po průchodu vstupním síťovým odrušovacím filtrem.

Proud mezi filtrem a frekvenčním měničem není vynášen do grafu. Důvodem je velké rušení během měření, které znehodnotilo měřený průběh. Toto rušení je patrné i z průběhu proudu za měničem, viz 7.1.3.2 b).

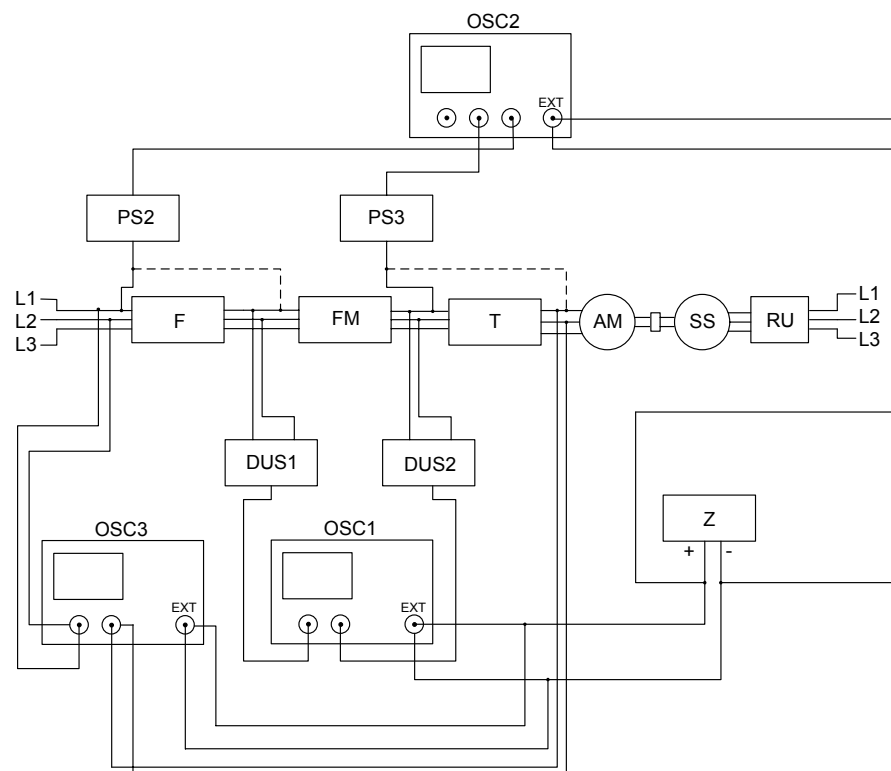
Detaily kladných půlvln a jednotlivých pulzů sdruženého napětí za měničem jsou obdobné jako v bodě 7.1.1.2 b), c). Jejich vyhodnocení se shoduje se závěry v bodě 7.1.1.3. Průběhy jsou uvedeny v příloze č. 3.

Důvodem použití vstupního filtru je splnění podmínek elektromagnetické kompatibility (EMC), viz kapitola 1.

7.1.4. Vstupní filtr – Měnič frekvence – Filtrační tlumivka - Asynchronní motor

7.1.4.1. Schéma zapojení, podmínky měření

Modulační frekvence byla nastavena na frekvenčním měniči FM na hodnoty $f_{\text{mod}} = 2, 8, 16$ kHz a napájecí frekvence asynchronního motoru AM na hodnoty $f_{\text{nap}} = 25$ a 50 Hz. Mezi napájecí síť a asynchronní motor byly zapojeny filtrační prvky v uspořádání: Vstupní filtr F – Frekvenční měnič FM – Filtrační tlumivka T. Byly změřeny průběhy napětí a proudů tohoto zapojení. S uspořádáním měřicích přístrojů, viz obr. 16.

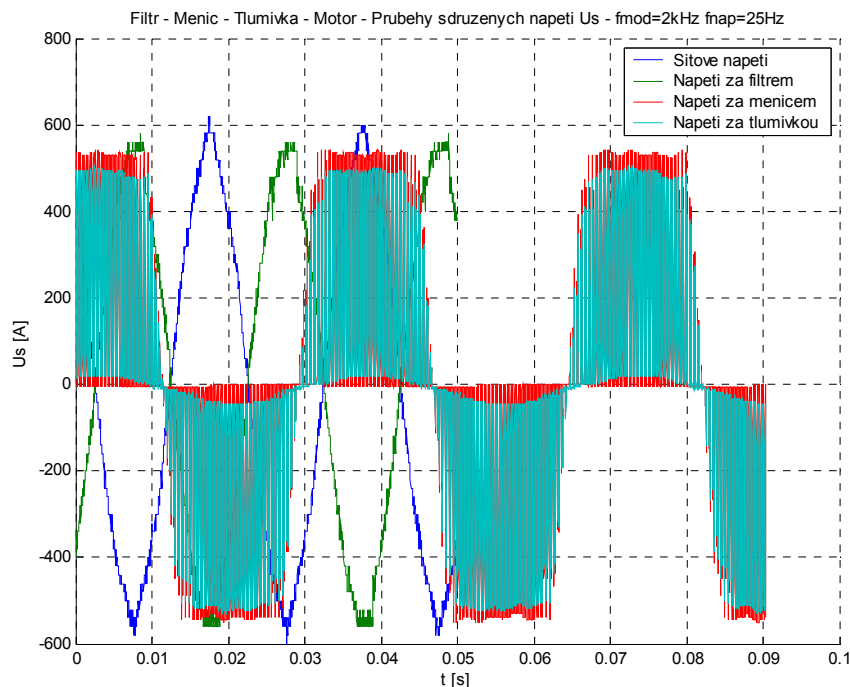


Obr. 16 Schéma zapojení pro uspořádání F-FM-T-AM

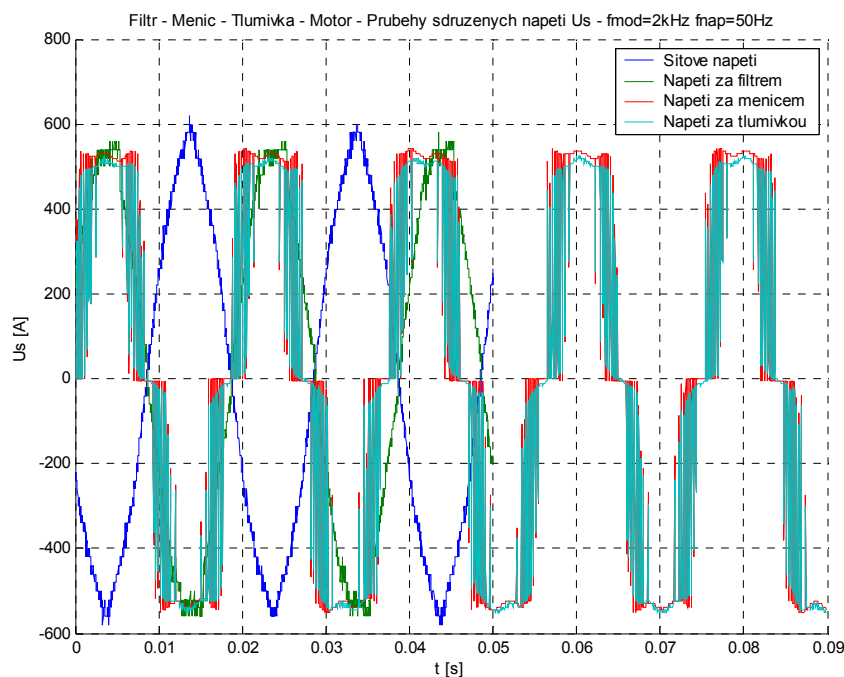
Z důvodu nedostatku vstupů na digitálním osciloskopu byly průběhy proudů měřeny ve dvou měřicích cyklech, kdy proudové sondy byly přepojovány do měřicích bodů viz obr. 16.

7.1.4.2. Změřené průběhy proudů a napětí

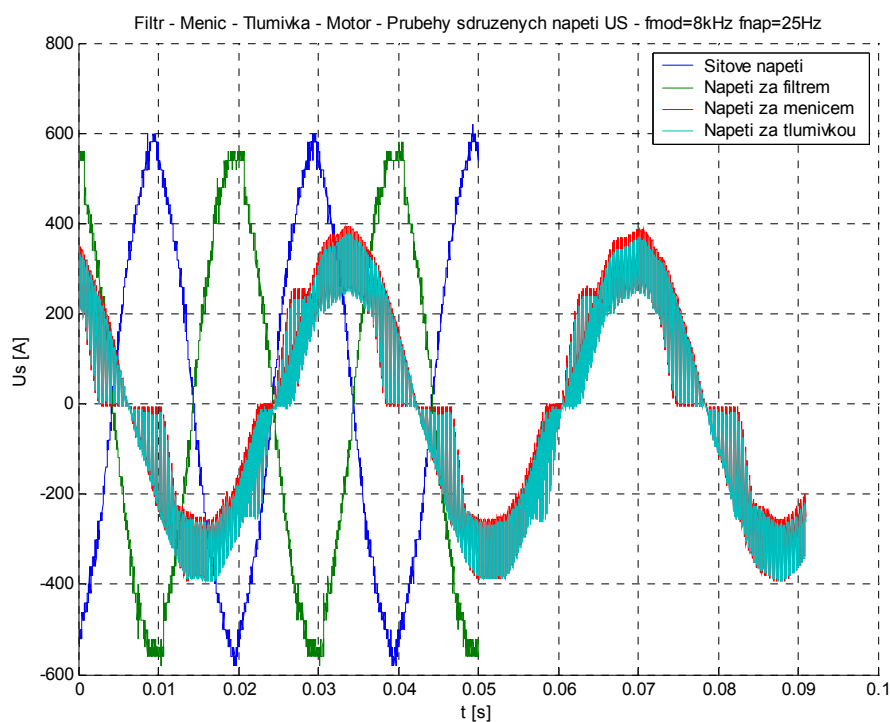
a) Průběhy sdružených napětí v uspořádání F – FM – T – AM



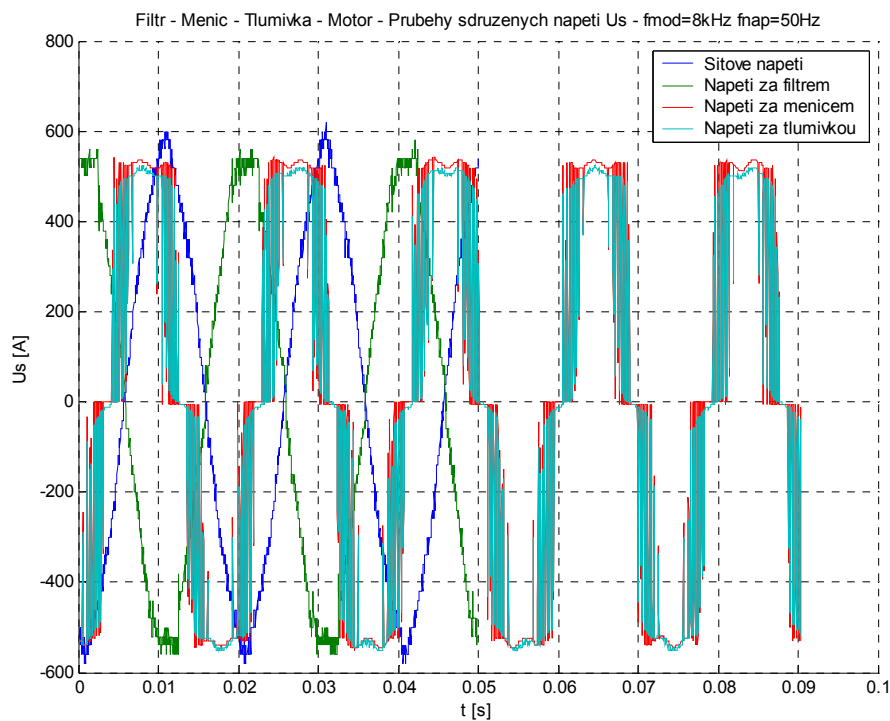
Graf č. 42 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



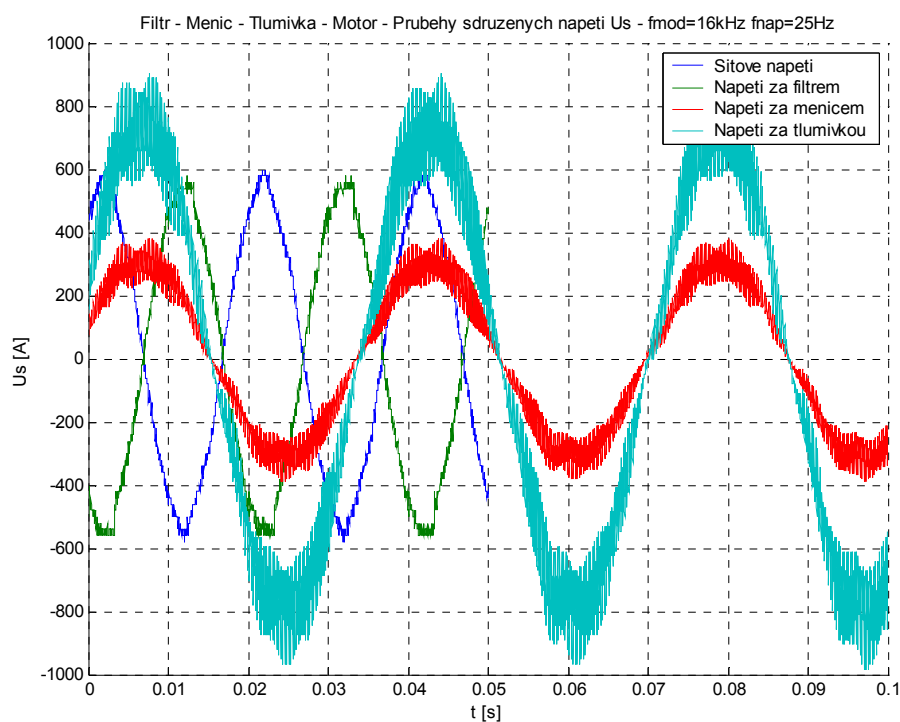
Graf č. 43 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



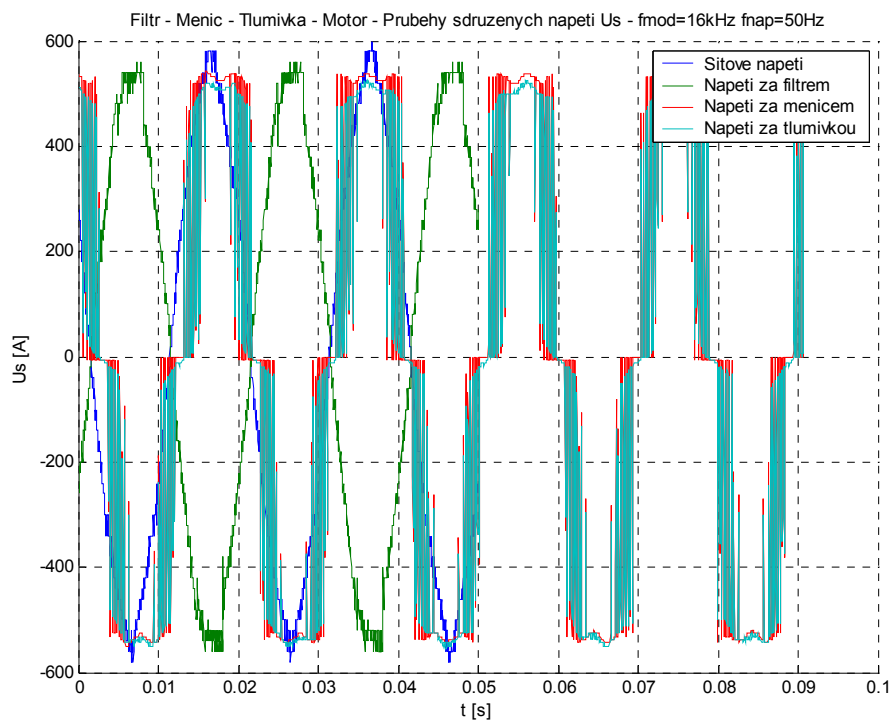
Graf č. 44 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 45 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



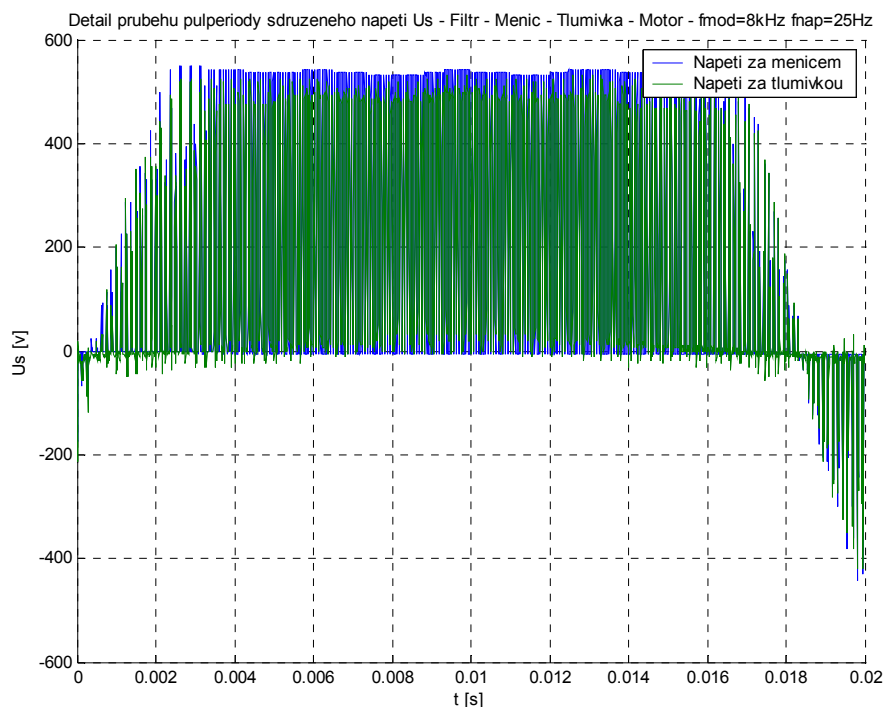
Graf č. 46 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



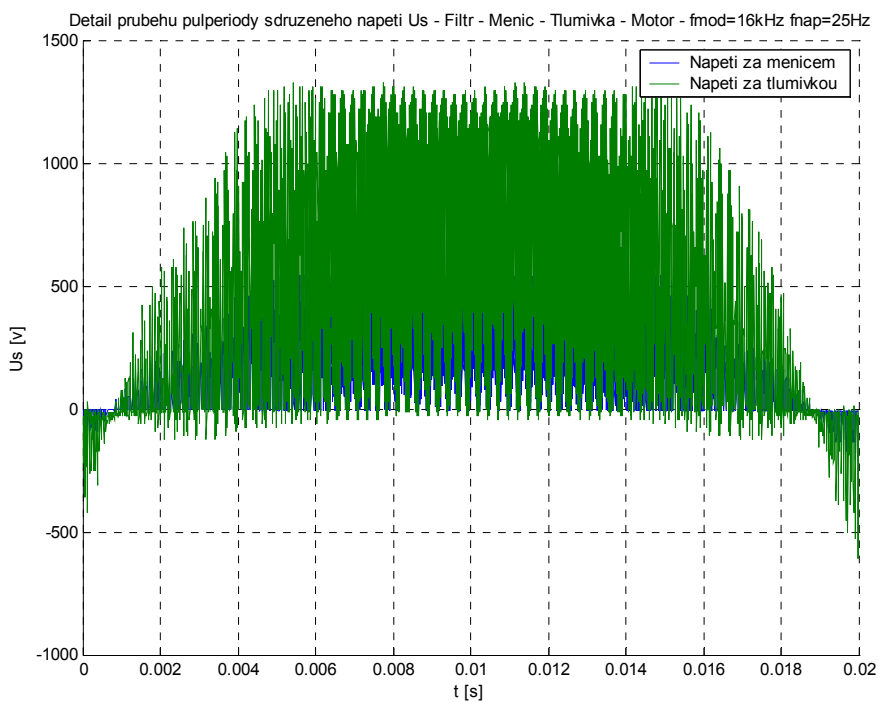
Graf č. 47 Průběhy sdruženého napětí v zapojení F-FM-T-AM $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$

b)

Detail průběhů kladné půlvlny sdružených napětí v uspořádání F-FM-T-AM

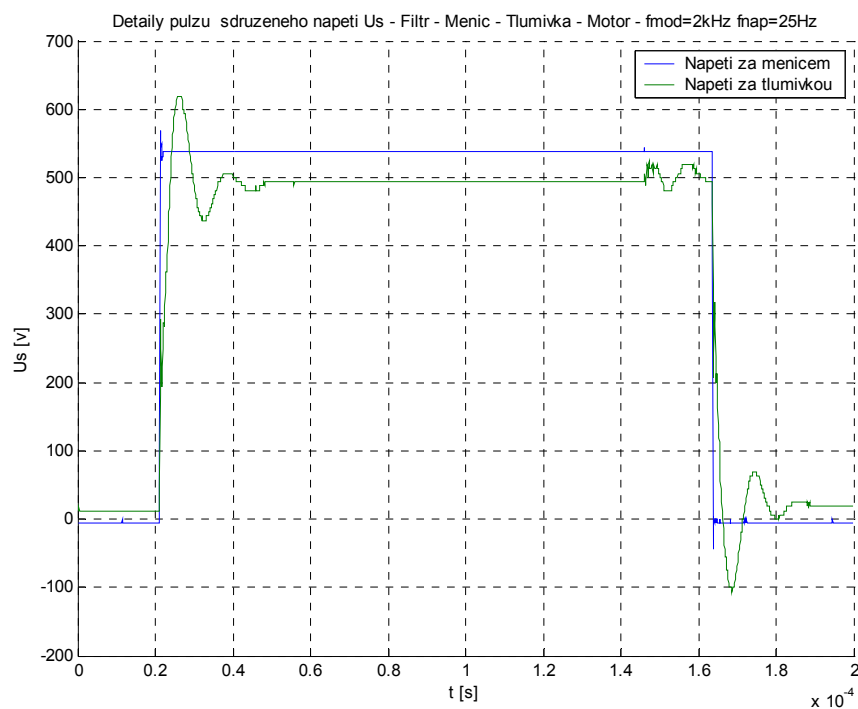


Graf č. 48 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM
 $f_{mod} = 8 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$

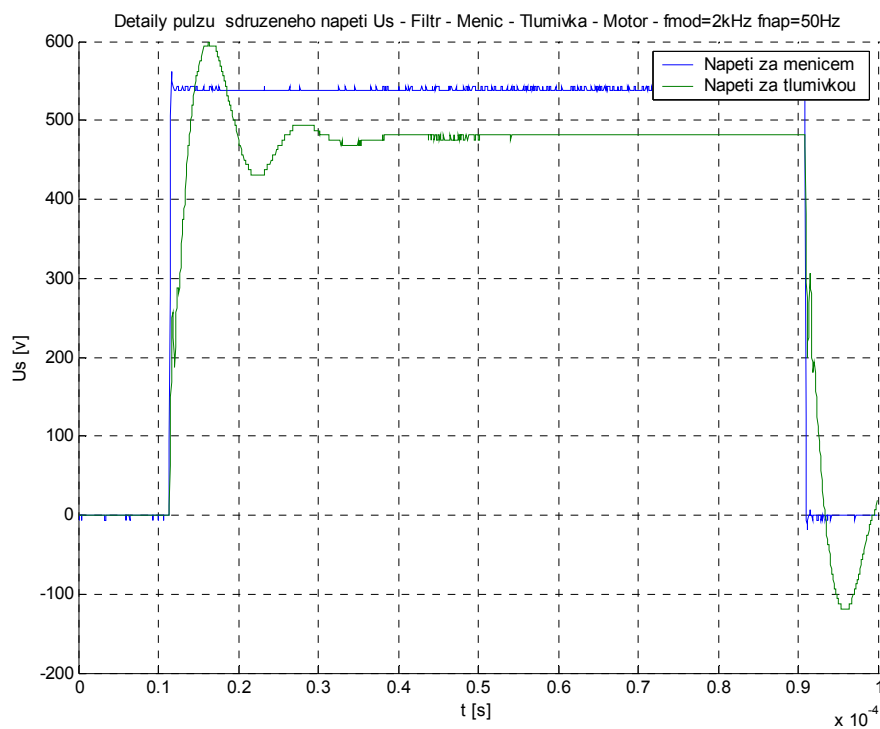


Graf č. 49 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM
 $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$

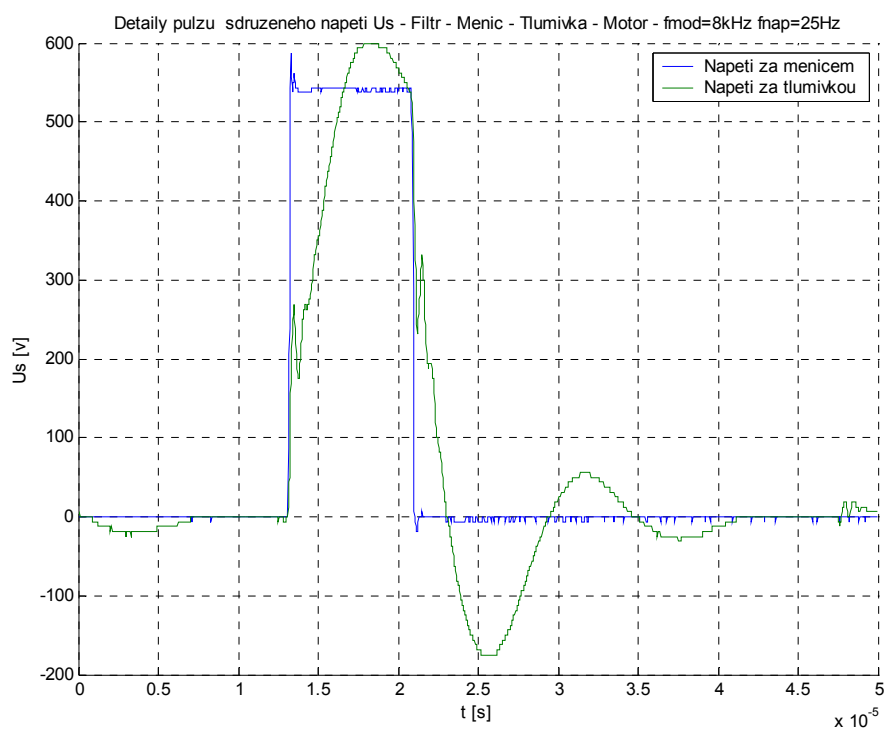
c) Detaily pulzů kladných půlvln sdružených napětí F-FM-T-AM



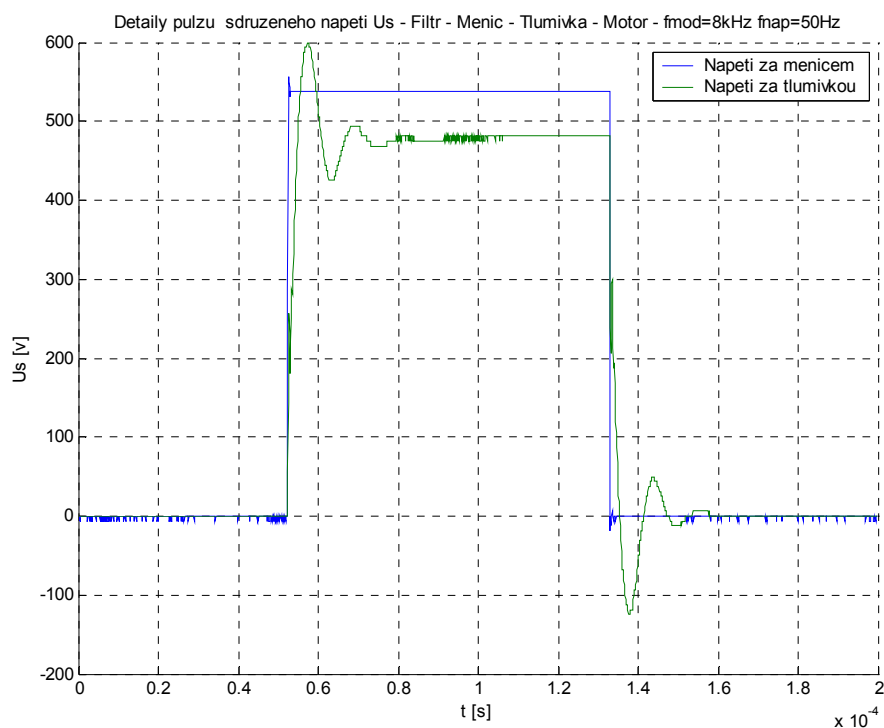
Graf č. 50 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



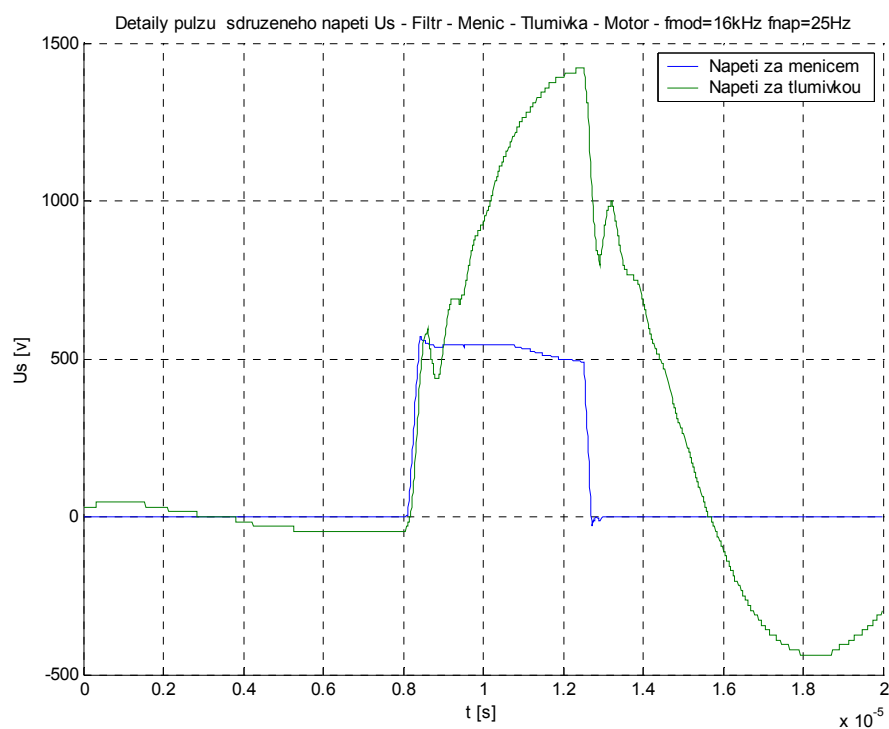
Graf č. 51 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$



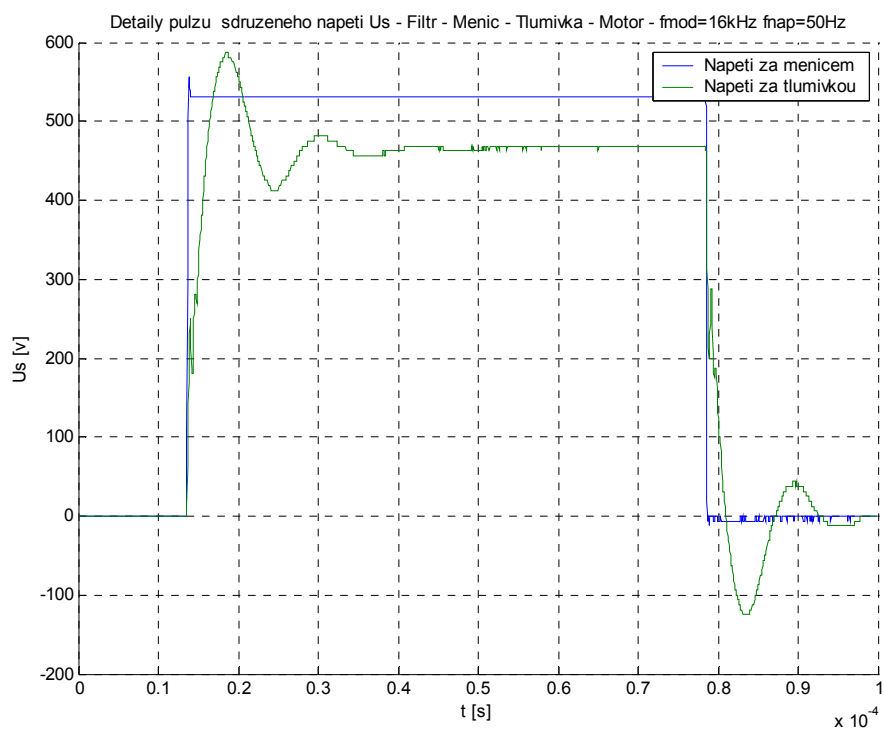
Graf č. 52 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 53 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

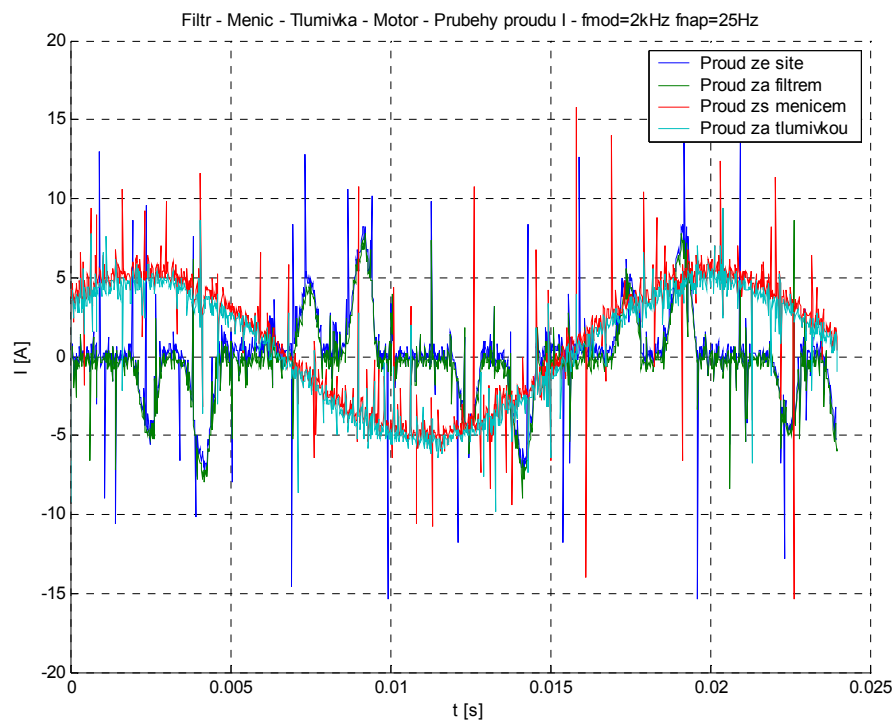


Graf č. 54 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$

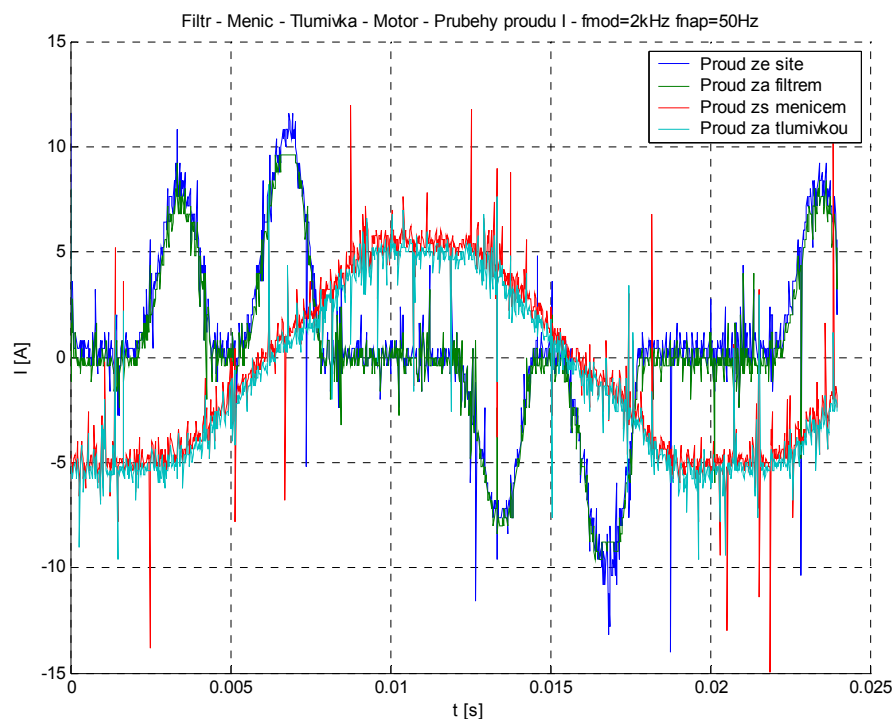


Graf č. 55 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$
 $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$

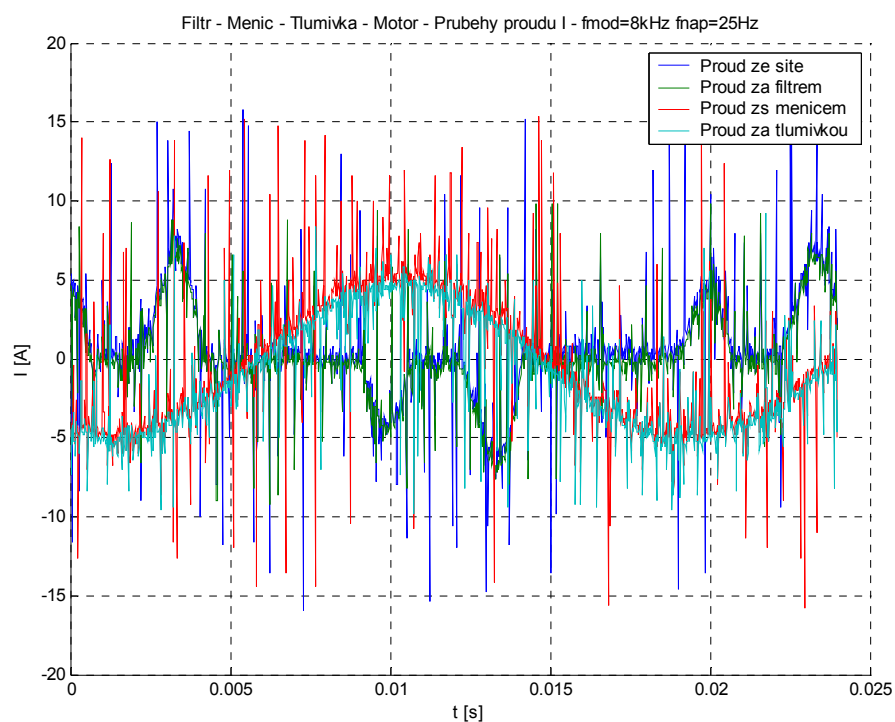
d) Průběhy proudů v uspořádání F - FM – T – AM



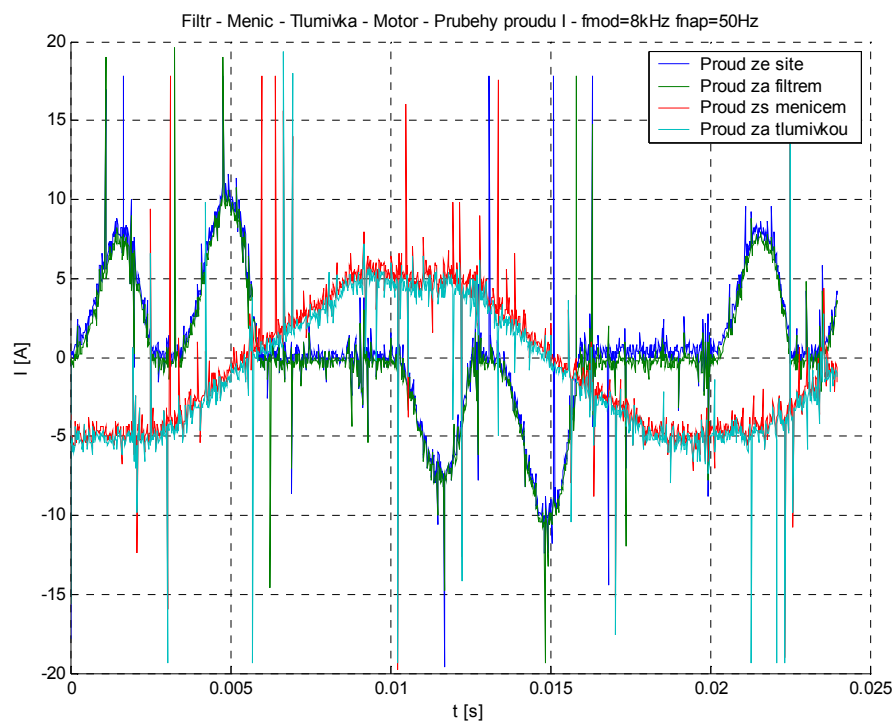
Graf č. 56 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 2 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



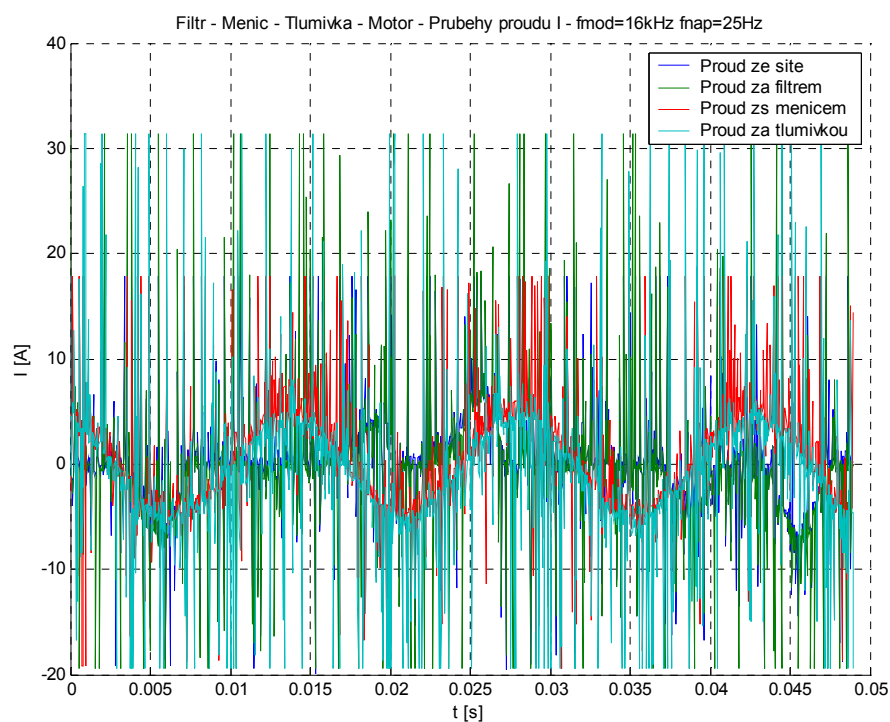
Graf č. 57 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{mod} = 2 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$



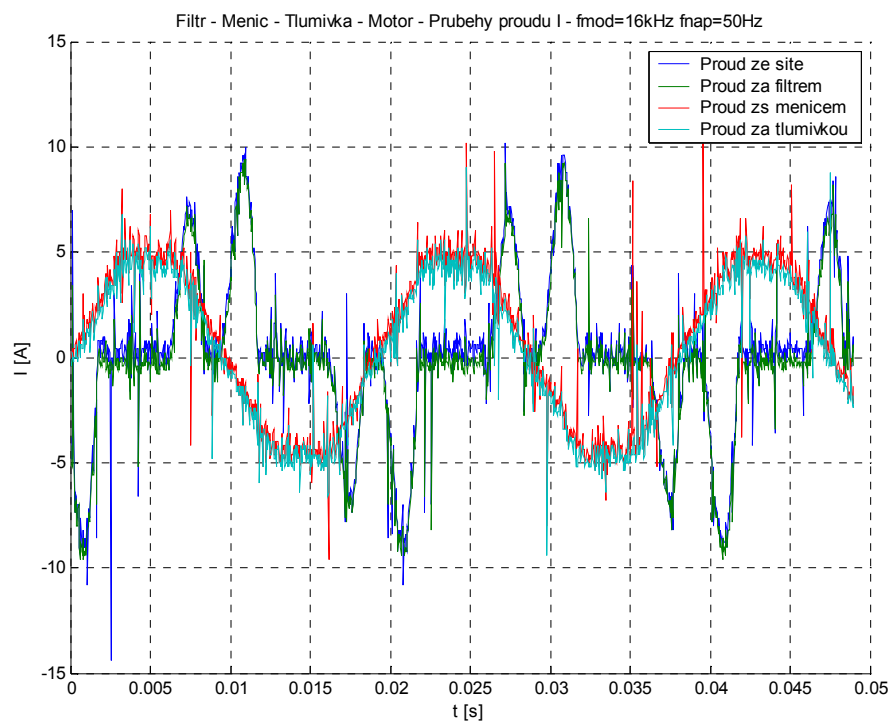
Graf č. 58 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 59 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



Graf č. 60 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Graf č. 61 Průběhy proudů v kombinaci F-FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

7.1.4.3. Vyhodnocení uspořádání Filtr – Měnič – Tlumivka – Asynchronní motor

V tomto uspořádání byly zapojeny do přívodního vedení všechny zkoumané prvky současně. Z naměřených průběhů, viz 7.1.4.2, je patrné, že uspořádání slučuje všechny předchozí kombinace. Proto i vyhodnocení chování pohonu je možné interpretovat jako složení předchozích závěrů, tedy že fázové posuny napětí a proudů odpovídají předchozím kombinacím. Na filtru i tlumivce dochází k úbytku sdruženého napětí. Tlumivka vyhlazuje procházející proud.

Použití vstupního odrušovacího filtru považuji za problematické, neboť po jeho použití se elektromagnetické rušení nesnižuje, ba právě naopak vzrůstá, viz porovnání průběhů proudů s použitím vstupního filtru oproti uspořádání bez vstupního filtru.

Měření při nastavení $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$ neodpovídá vlastnostem zjištěným ostatními měřeními, viz graf č. 46, graf č. 49, graf č. 54, graf č. 60. Toto uspořádání se zvolenou modulační frekvencí je tedy zcela nepoužitelné pro provoz pohonu.

8. Měření při různých způsobech řízení

8.1. Vlastní měření

Pro porovnání chování asynchronního motoru při různých způsobech řízení (vektorové, skalární) bylo potřeba získat průběhy efektivních hodnot sdruženého napětí, statorového proudu, průběhu otáček a výkonu. Použité přístroje jsou uvedeny v příloze č.1.

Pro zaznamenání těchto hodnot existuje v softwaru DriveMonitor, což je software určený pro sledování veličin frekvenčního měniče, funkce „Trace“. Tato funkce umožňuje označit žádané veličiny a po spuštění měniče je zaznamená. Bohužel funkce „Trace“ pro měřený frekvenční měnič nefungovala. Důvod nefunkčnosti nebyl zjištěn. Proto byl zvolen jiný postup pro zaznamenání potřebných průběhů.

Frekvenční měnič obsahuje dva analogové výstupy, na které je možno přivádět žádaný parametr. Na výstup byly postupně přiváděny požadované veličiny a zaznamenávány průběhy těchto veličin v čase pomocí digitálního osciloskopu. Měření probíhalo po jednotlivých veličinách, protože byl k dispozici pouze jeden funkční analogový výstup, analogový výstup 1.

Rozsah analogového výstupu byl zvolen ± 10 V stejnosměrných. Data pro přepočet naměřených údajů na skutečné hodnoty jsou uvedeny v návodu k obsluze frekvenčního měniče. [10]

Nastavení parametrů frekvenčního měniče:

- Parametr P655 – nastavení veličiny vyváděné na analogový výstup 1
- Parametr r003 – výstupní napětí (efektivní hodnota)
- Parametr r004 – výstupní proud z měniče (efektivní hodnota)
- Parametr r005 – výstupní činný výkon
- Parametr r218 – okamžitá hodnota otáček motoru

Typy použitých řízení pro regulaci otáček:

- Skalární řízení U/f s měřením otáček
- Skalární řízení U/f bez měření otáček
- Vektorové řízení s měřením otáček
- Vektorové řízení bez měření otáček

Pro všechny typy regulace byla nastavena modulační frekvence 2 kHz a požadovaná hodnota otáček na 100% jmenovitých otáček motoru (tomu odpovídá 925 ot/min).

Po každé změně typu řízení byla provedena nová parametrizace frekvenčního měniče (dle pokynů v návodu). Tato parametrizace probíhá podle postupu uvedeného v návodu k použití frekvenčního měniče. Součástí této parametrizace je i optimalizace otáčkového regulátoru. [10]

Měření bylo provedeno pro dva případy:

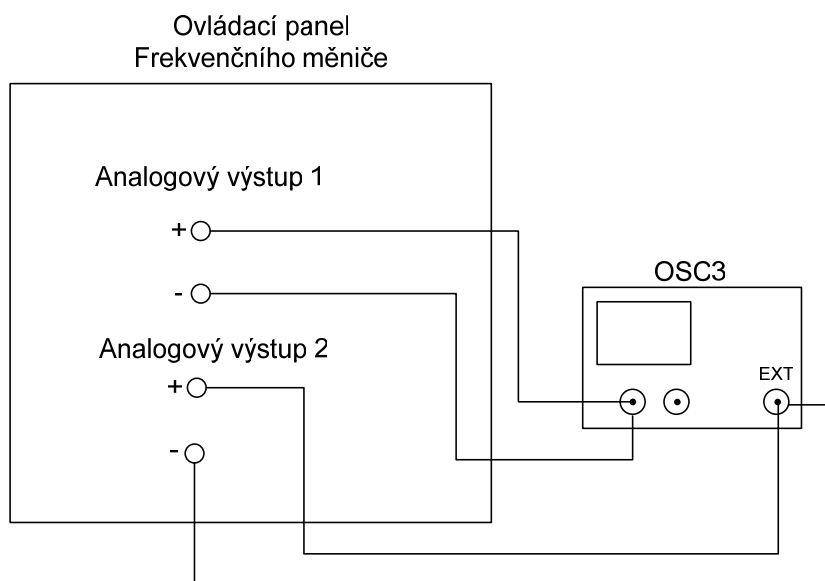
- Při rozběhu motoru naprázdno
- Při zatížení asynchronního motoru v ustáleném stavu

8.1.1. Chování asynchronního motoru při rozběhu naprázdno s různými způsoby řízení

8.1.1.1. Schéma měření, podmínky měření

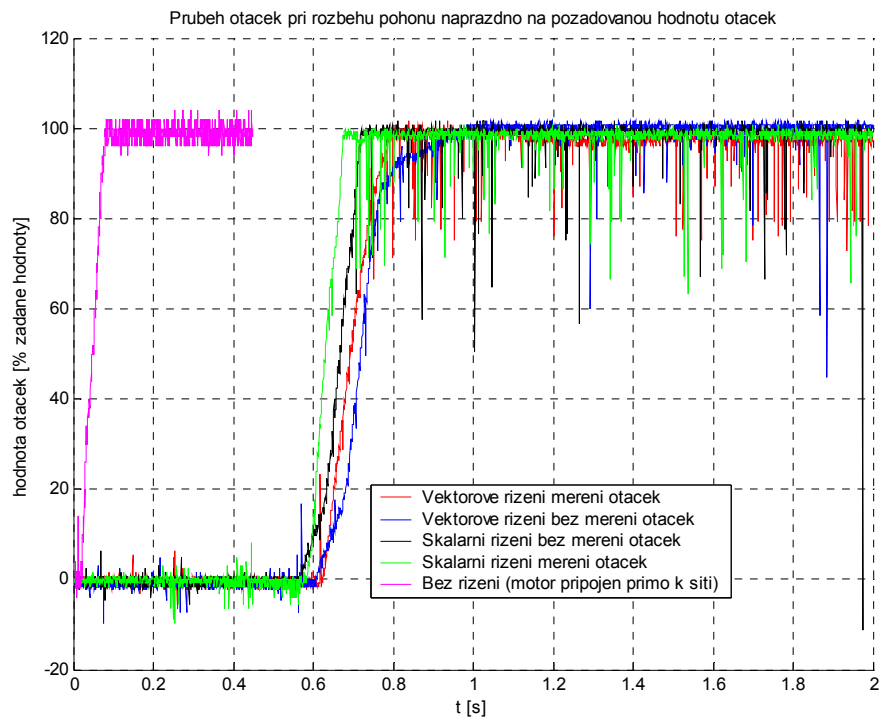
Pro porovnání chování řízeného asynchronního motoru s chováním motoru připojeného přímo do napájecí sítě, byly změřeny průběhy otáček a proudu asynchronního motoru připojeného k napájecí síti. Asynchronní motor byl připojen k síti přes přípravek pro reverzaci motoru (k dispozici v laboratoři), aby se dal asynchronní motor ovládat pomocí tlačítek „Start“, „Stop“ a v neposlední řadě z bezpečnostních důvodů. Průběh otáček byl měřen pomocí inkrementálního čidla otáček umístěného na asynchronním motoru, jehož průběhy jsou vyvedeny na frekvenční měnič. Údaje o aktuálních otáčkách byly získávány z analogového výstupu frekvenčního měniče. Statorový proud byl měřen pomocí klešťové proudové sondy přímo na napájecím vedení, viz obr. 17.

Ostatní veličiny byly změřeny podle popisu uvedeného v bodě 8.1. Spouštění osciloskopu bylo realizováno pomocí externí spouště. Spouštěcím impulzem byla změna hodnoty analogového výstupu 2 z nulové hodnoty na větší (analogový výstup 2 sloužil pouze pro spouštění, nešlo na něm zobrazovat požadované měřené veličiny z důvodu jeho nefunkčnosti).

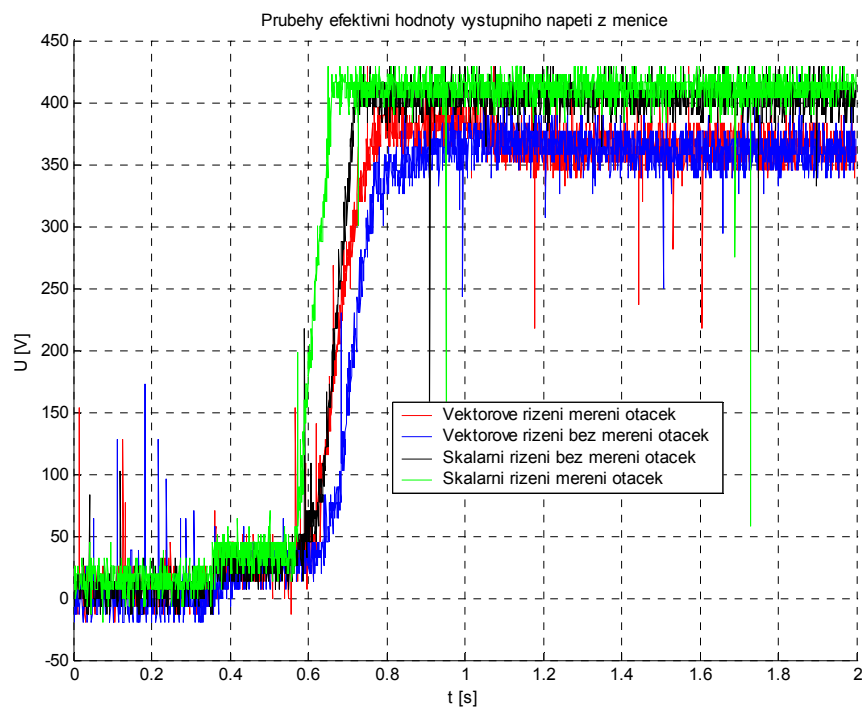


Obr. 17 Schéma zapojení při rozběhu asynchronního motoru

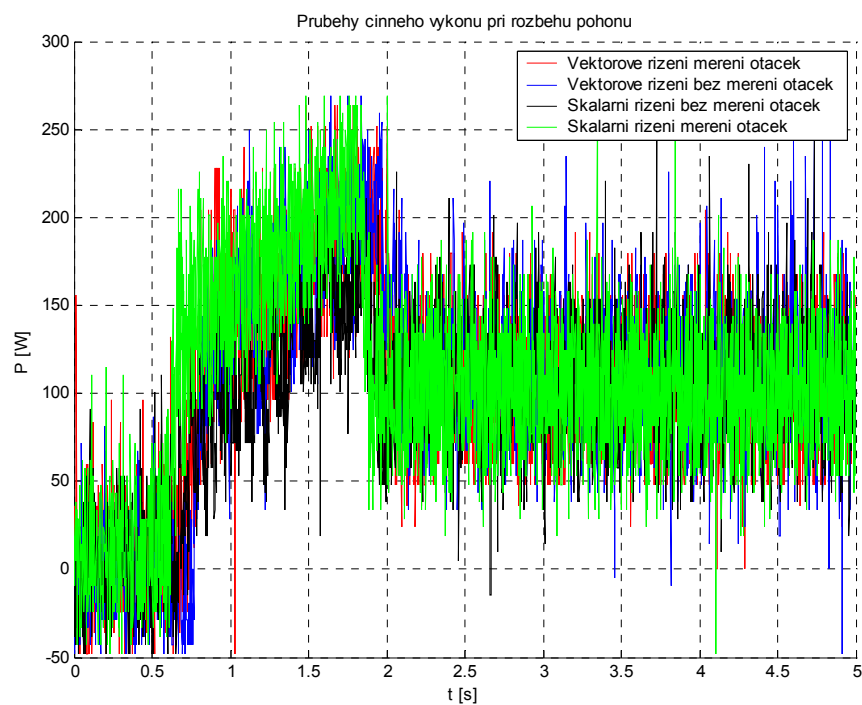
8.1.1.2. Naměřené průběhy



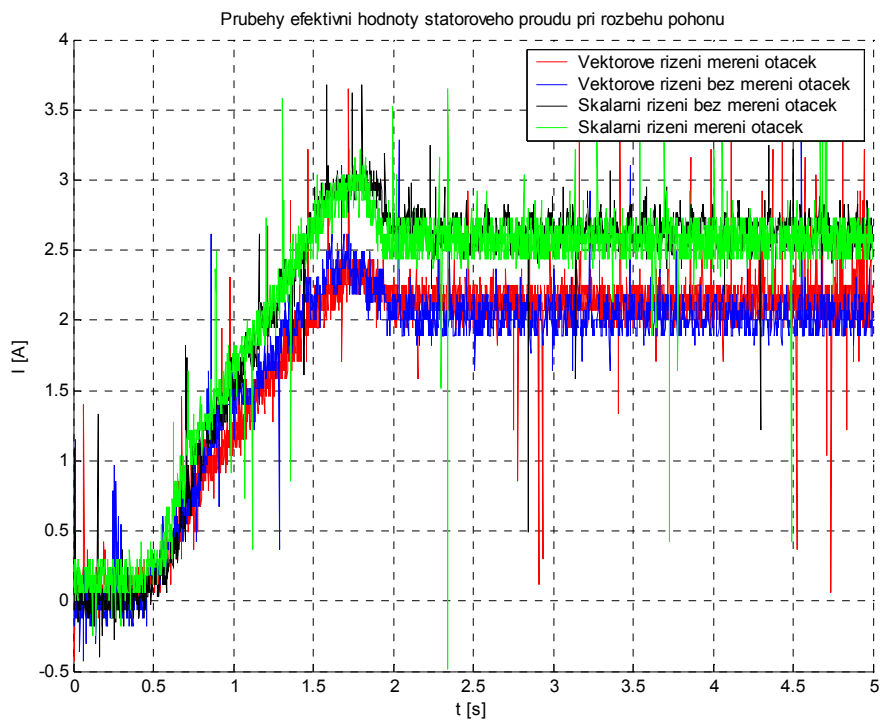
Graf č. 62 Průběhy otáček při rozběhu motoru s různým řízením



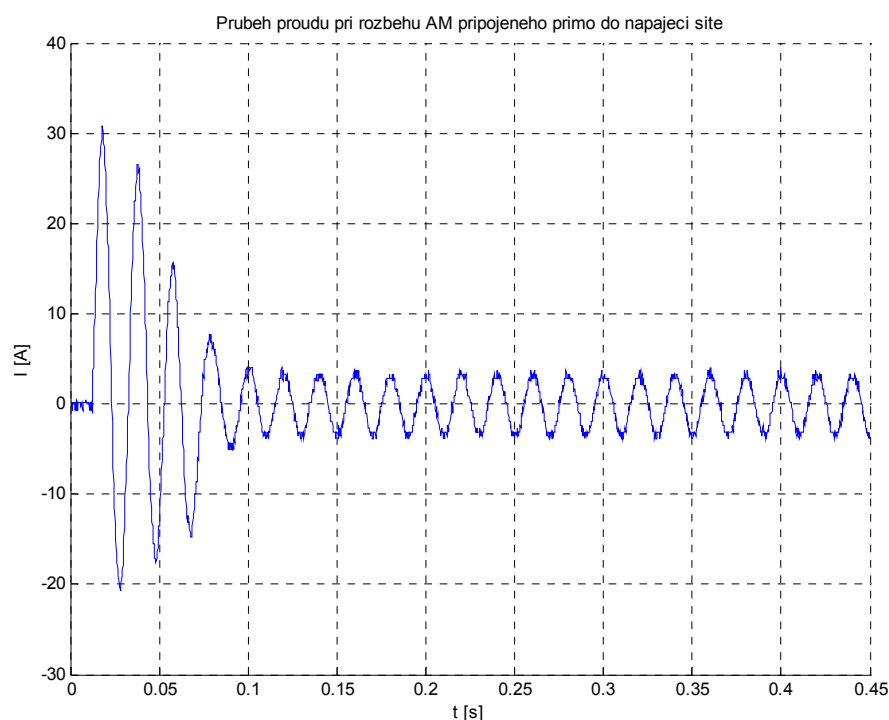
Graf č. 63 Průběhy efektivních hodnot výstupního napětí měniče při rozběhu motoru s různým řízením



Graf č. 64 Průběhy činného výstupního výkonu měniče při rozběhu motoru s různým řízením



Graf č. 65 Průběhy efektivních hodnot výstupního proudu měniče při rozběhu motoru s různým řízením



Graf č. 66 Průběh statorového proudu při připojení měniče přímo k napájecí síti

8.1.1.3. Vyhodnocení

Protože měření probíhalo v rozsahu hodnot ± 10 V a rušení z okolí ovlivňující měřené hodnoty dosahovalo hodnot až přes ± 2 V, jsou hodnoty po přepočtu na skutečné veličiny hodně zkreslené. Přesto lze z naměřených průběhů vyvodit tyto závěry:

- Nejrychlejší rozběh motoru na požadovanou hodnotu otáček je v případě, že motor připojíme přímo k napájecí síti, viz graf č. 62. Nevýhodou je devětkrát vyšší efektivní hodnota rozběhového proudu oproti ustálené hodnotě proudu bez zatížení (při rozběhu je efektivní hodnota proudu 22 A, ustálená efektivní hodnota proudu naprázdno je 2,48 A), viz graf č. 66. Další nevýhoda je, že při přímém připojení asynchronního motoru k napájecí síti není možné regulovat napájecí frekvenci (otáčky motoru).
- Spuštění pohonu při řízení měničem je provedeno v čase 0 s. Přesto reakce pohonu nastává přibližně za 0,6 s, viz grafy č. 62,63,64 a 65. Toto zpoždění je zřejmě způsobeno kontrolou nastavených parametrů před spuštěním motoru.

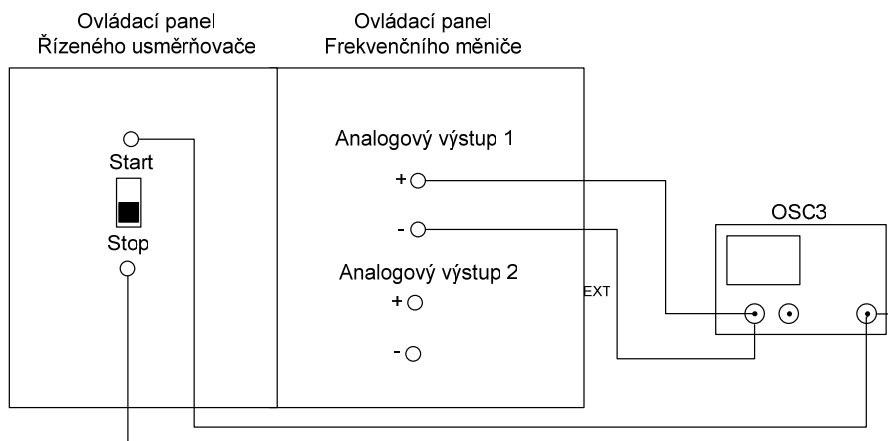
- Ve srovnání rychlosti dosažení požadované hodnoty otáček vycházejí lépe skalární řízení vůči vektorovým, viz graf č. 62. Příčinu bych viděl v použití automatického parametrování otáčkového PI regulátoru.
- Při řízení s čidlem otáček je průběh regulace rychlejší než bez použití informace získané ze snímače otáček, viz graf č. 62. Zpoždění je způsobeno větší výpočetní náročností. Je zde nutnost získat informace potřebné pro řízení pomocí výpočtů v matematickém modelu asynchronního motoru.
- Při vektorovém řízení je dosaženo požadované hodnoty otáček při nižším statorovém proudu, viz graf č. 65, což je způsobeno kvalitnější vektorovou regulací.

8.1.2. Chování asynchronního motoru při změně zatížení a různém řízení

8.1.2.1. Schéma měření, podmínky měření

Změna zatížení byla realizována tak, že byl asynchronní motor AM rozeběhnut naprázdno na 100 % požadovaných otáček (925 ot/min) a skokově zatížen stejnosměrným motorem SS. Ten byl zatěžován na jmenovitou hodnotu proudu 3,8 A. Stejnosměrný motor byl řízen pomocí řízeného usměrňovače napětí RU. Řízení bylo nastaveno parametrem P84 tak, aby stejnosměrný motor udržoval konstantní moment. Tento moment působil proti momentu asynchronního motoru a fungoval jako jeho zátěž.

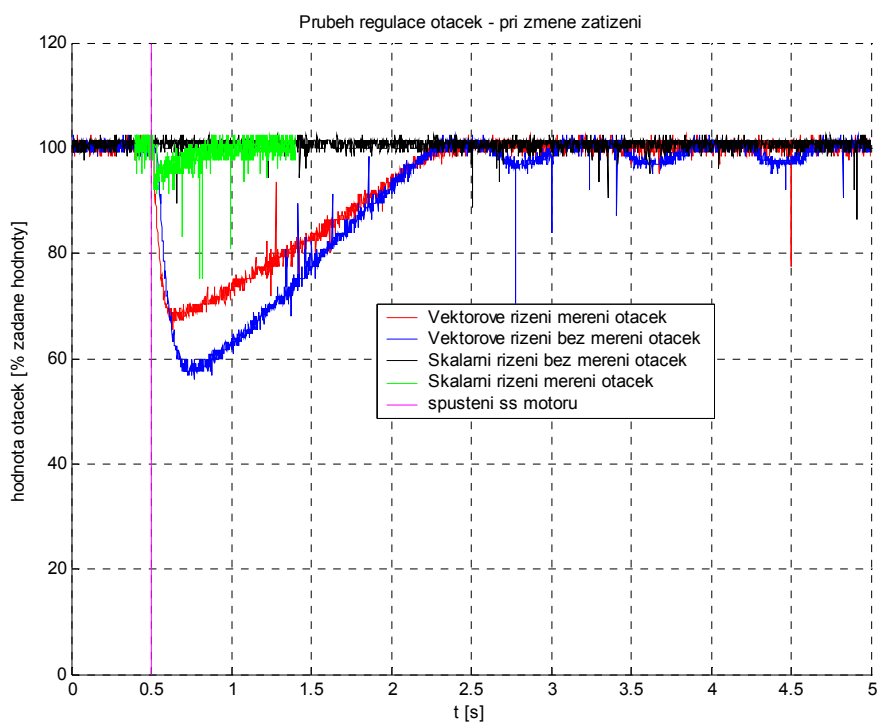
Potřebné průběhy veličin byly odměřeny podle postupu uvedeného v bodě 8.1. Spouštění osciloskopu bylo realizováno externí spouští připojenou v tomto případě na ovládací přepínač „Start/Stop“ stejnosměrného motoru, viz obr. 18. Hodnota „pretriggeru“ (měření dat před spouštěcím impulzem) byla nastavena na 10 % celkové doby měření, aby se zaznamenala informace o ustáleném stavu před připojením zátěže.



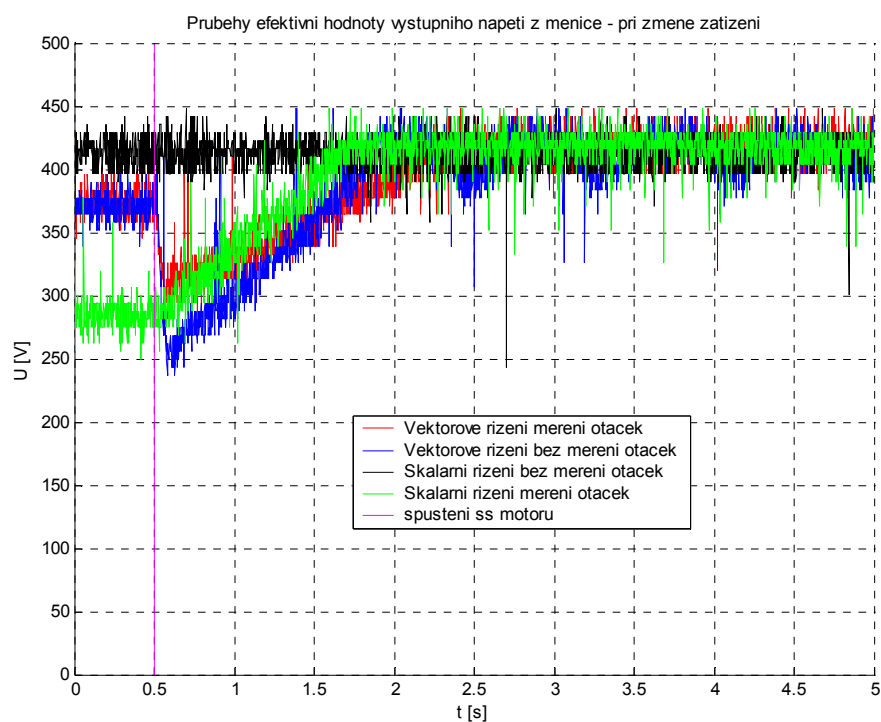
Obr. 18 Schéma zapojení při změně zátěže

Čas připnutí zátěže je v grafech barevně vyznačen (fialová linka).

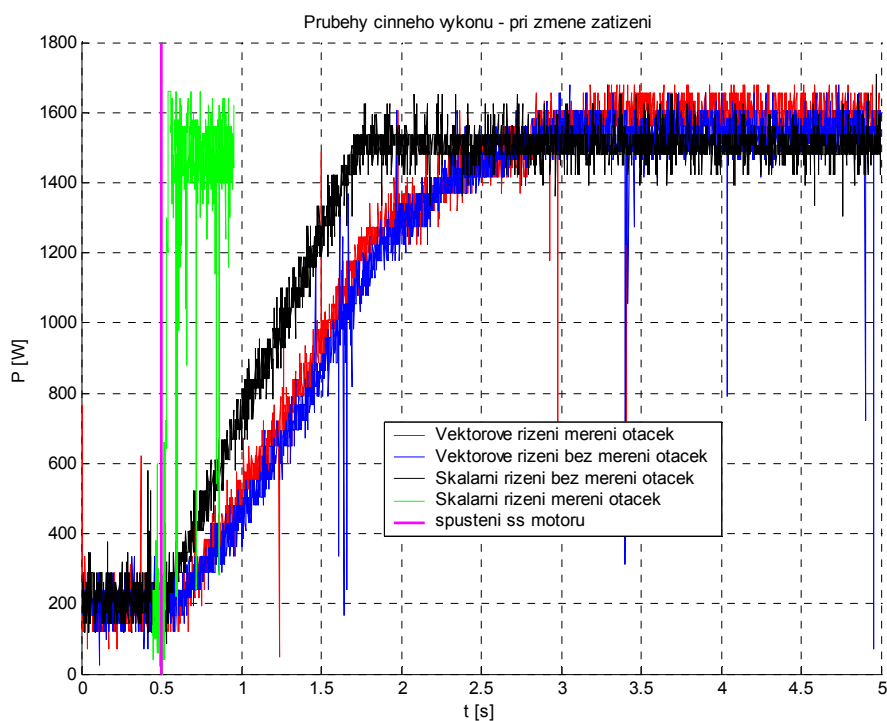
8.1.2.2. Naměřené průběhy



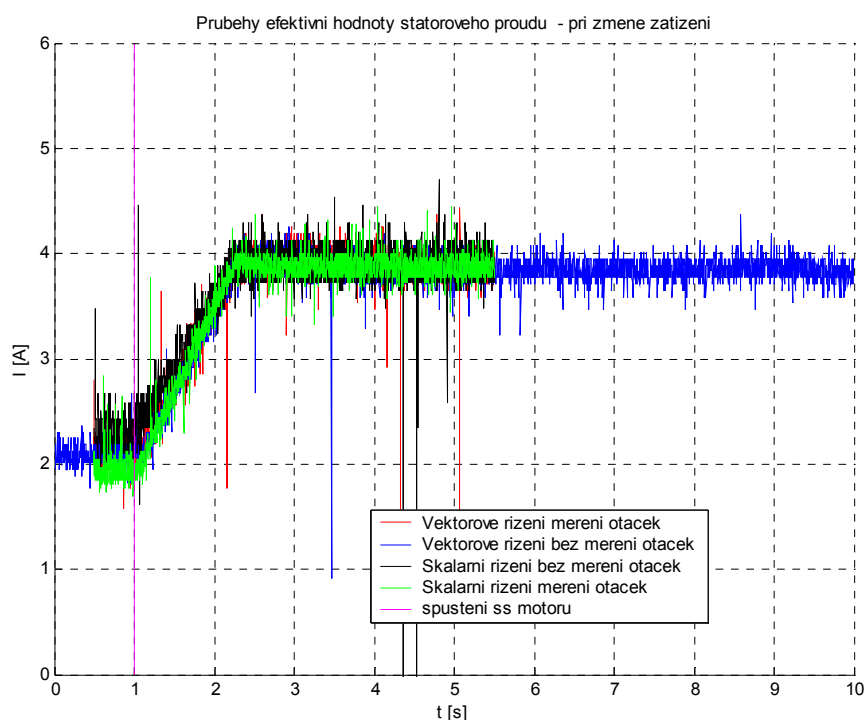
Graf č. 67 Průběhy otáček při změně zátěže motoru s různým řízením



Graf č. 68 Průběhy efektivních hodnot výstupního napětí měniče při změně zátěže motoru s různým řízením



Graf č. 69 Průběhy činného výstupního výkonu měniče při změně zatížení motoru s různým řízením



Graf č. 70 Průběhy efektivních hodnot výstupního proudu měniče při změně zatížení motoru s různým řízením

8.1.2.3. Vyhodnocení

Platí závěry vyvozené v kapitole 8.1.1.3, tedy že skalární řízení poskytuje rychlejší regulační pochod než vektorové, viz graf č. 67. Podle teoretických znalostí by měl platit opak. Zdůvodnění bych opět hledal v automatickém parametrování PI regulátoru otáček. Dokladem toho je i průběh otáček a statorového proudu při vektorové regulaci bez použití čidla otáček. Po automatické parametrizaci PI regulátoru a následném zatížení pohonu nedochází k ustálení na požadovanou hodnotu otáček, ale k rozkmitání kolem požadované hodnoty.

Závěr

V rámci diplomové práce byla vytvořena struktura zapojení měřících přístrojů pro zaznamenání požadovaných průběhů a jejich přenesení do počítače. Po zpracování byla naměřená data vyhodnocena v porovnání s nastudovanými teoretickými znalostmi. Vyhodnocení je platné pouze pro použitý střídavý pohon a nelze použít obecně, protože podmínky při měření se mohou lišit. Jedná se hlavně o podmínky elektromagnetické kompatibility.

Rozborem naměřených průběhů při zadaných uspořádáních přívodního vedení bylo dosaženo těchto závěrů. Použití vstupního filtru F by mělo mít vliv na snížení rušení. Podle průběhů statorového proudu v uspořádáních, kdy byl filtr použit, viz 7.1.3.2 b) na str. 44, 7.1.4.2 d) na str. 52 a jejich srovnáním s průběhy bez použití vstupního filtru, viz 7.1.1.2 a) na str. 26 a 7.1.2.2 b) na str. 38, je zřetelný opak, zvýšení rušení. Ze zbylých možností uspořádání bych za výhodnější považoval zapojení frekvenční měnič – filtrační tlumivka. Důvodem je srovnání průběhů statorových proudů, kdy s použitím filtrační tlumivky docházelo k vyhlazení proudu, viz 7.1.2.2 b) na str. 38. Zařazením filtrační tlumivky nastával problém s deformací napěťových pulzů se vzrůstající modulační frekvencí, viz 7.1.2.2 d) na str. 39.

Při porovnání chování asynchronního motoru napájeného sinusovým napětím o frekvenci 50 Hz vůči napájení z měniče frekvence s různým řízením byla posuzována hlavně rychlost regulačního pochodu otáček. Modulační frekvence byla zvolena 2 kHz a požadovaná hodnota napájecího napětí 50 Hz, což odpovídá jmenovitým otáčkám motoru 925 ot/min.

Nejrychleji bylo dosaženo požadované hodnoty otáček při přímém připojení motoru k napájecí síti, viz graf. č. 62 na str. 65. V tomto případě však nelze řídit rychlost otáčení a není vhodný vysoký proud při rozběhu motoru, viz graf č. 66 na str. 67. Výhodou vektorového řízení bylo dosažení požadovaných otáček při menší hodnotě statorového proudu, viz graf č. 65 na str. 66.

Ze změřených průběhů otáček motoru, viz graf č. 62 str. 65 a graf č. 67 na str. 69 plyne, že řízením bez čidla otáček bylo dosaženo požadovaných otáček později než když bylo používáno.

Důvodem horší regulace při použití vektorového řízení byl algoritmus optimalizace otáčkového PI regulátoru frekvenčního měniče. Optimalizace tohoto regulátoru byla součástí parametrizování frekvenčního měniče prováděná při každé změně způsobu řízení střídače frekvenčního měniče.

V rámci řešení 3. bodu zadání diplomové práce bylo nejvýhodnějším uspořádáním pohonu zvoleno zapojení frekvenční měnič – filtrační tlumivka – asynchronní motor s modulační frekvencí mezi 2 až 8 kHz.

Závěrem 2. bodu zadání bylo zvolení skalárního řízení jako nejvhodnějšího způsobu řízení střídače při použití automatického nastavení parametrů otáčkového regulátoru frekvenčního měniče.

Seznam zkratek

RS232	standardizované sériové rozhraní
AC	označení střídavého proudu nebo napětí
DC	označení stejnosměrného proudu nebo napětí
EMC	elektromagnetická kompatibilita
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn Off (thyristor)
AS	asynchronní stroj
AM	asynchronní motor
F	vstupní filtr
FM	frekvenční měnič
T	filtrační tlumivka
DSR	Direkte Selbst Regelung
DTC	Direct Torque Control
TTL	Transistor – Transistor Logic
IRC	Incremental Rotation Counter
PI	proporcionálně integrační regulátor

Seznam použité literatury

- [1] SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control Compendium, Siemens AG 1996
- [2] ČSN IEC 50(161) Mezinárodní elektrotechnický slovník – Elektromagnetická kompatibilita
- [3] <http://k313.feld.cvut.cz/emc/>, Katedra elektrotechnologie FEL ČVUT Praha
- [4] www.elfis.cz Elfis s.r.o. Praha
- [5] Oetter, J.: Výkonová elektronika pre elektrické pohony, Alfa Bratislava 1988
- [6] Javůrek, J.: Regulace moderních elektrických pohonů, Grada Publishing 2003
- [7] Pavelka, J. – Čeřovský Z. – Javůrek J.: Elektrické pohony, skriptum ČVUT Praha 2001
- [8] Vondrášek, F.: Výkonová elektronika - svazek III – Měniče s vlastní komutací a bez komutace, skriptum ZČU Plzeň 2001
- [9] www.fei.vsb.cz/kat448/, Katedra výkonové elektroniky a el. pohonů FEI VŠB-TU Ostrava
- [10] SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control Operating Instruction, Siemens AG 1996

Seznam obrázků

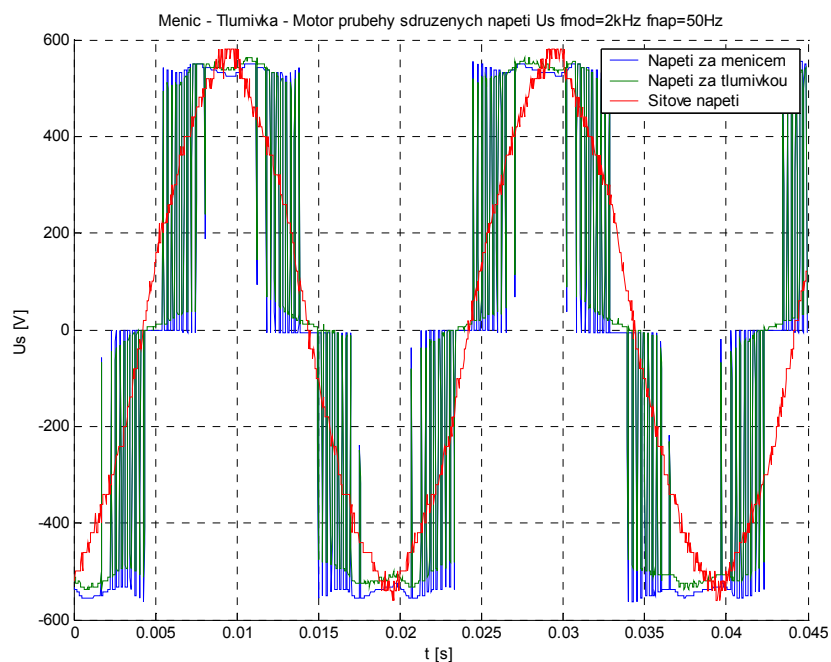
Obr. 1 Připojení pohonu přes vstupní filtr	11
Obr. 2 Obecný nepřímý měnič kmitočtu	12
Obr. 3 Můstkový diodový usměrňovač	13
Obr. 4 Pulzní napěťový usměrňovač	13
Obr. 5 Nepřímý měnič kmitočtu s napěťovým střídačem.....	14
Obr. 6 Schéma třífázového střídače s napěťovým meziobvodem	15
Obr. 7 Náhradní schéma třífázového měniče frekvence s napěťovým meziobvodem	15
Obr. 8 Průběhy napětí střídače při amplitudovém řízení	16
Obr. 9 Proud a napětí na zátěži při pulzně šířkové modulaci	17
Obr. 10 Princip kmitočtově napěťového řízení	18
Obr. 11 Konstrukce inkrementálního čidla.....	21
Obr. 12 Průběhy signálů na výstupu impulzního snímače rychlosti otáčení.....	21
Obr. 13 Schéma zapojení pro uspořádání FM – AS.....	24
Obr. 14 Schéma zapojení pro uspořádání FM-T-AM.....	36
Obr. 15 Schéma zapojení pro uspořádání F - FM - AM.....	43
Obr. 16 Schéma zapojení pro uspořádání F-FM-T-AM	51
Obr. 17 Schéma zapojení při rozběhu asynchronního motoru	64
Obr. 18 Schéma zapojení při změně zátěže.....	69

Přílohy

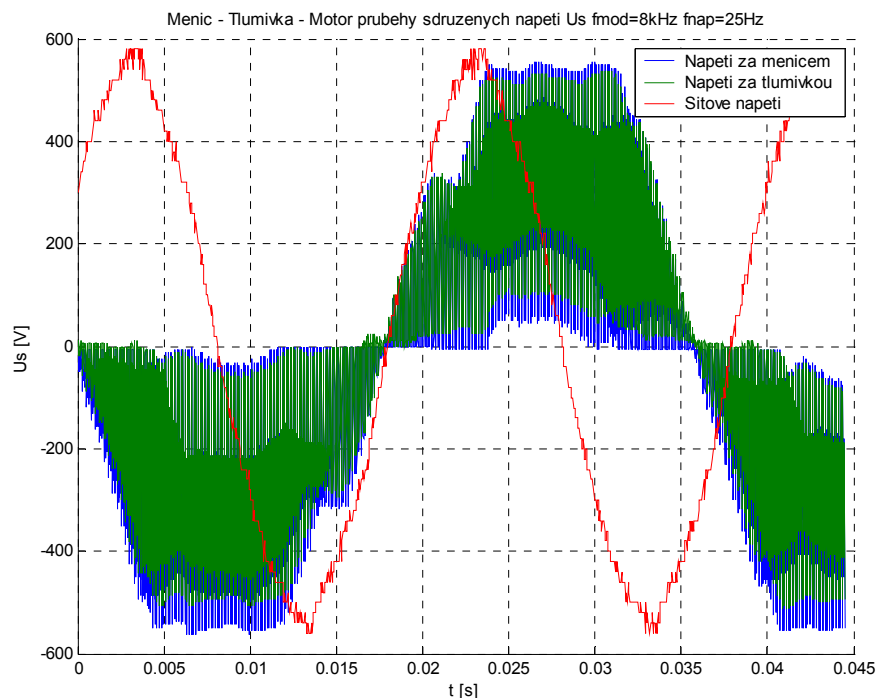
Příloha č. 1: Seznam použitých přístrojů

- OSC1 – digitální osciloskop Agilent 54622D s.č.: MY40004110
dvou-kanálový
- OSC2 – digitální osciloskop Tektronix TDS 224 – čtyř-kanálový
- OSC3 – digitální osciloskop Tektronix THS 720P – dvou-kanálový
- DUS1 – diferenciální napěťová sonda Sapphire Instruments s.č.037957
max. 1000 V rms CAT III
- DUS2 – diferenciální napěťová sonda Agilent N2772A s.č.US39450665
max 600 V rms CAT III
- PS1 – klešťová proudová sonda LEM HEME PR200 – přenos 10 mV / 1 A
- PS2 – klešťová proudová sonda LEM HEME PR200 – přenos 10 mV / 1 A
- PS3 – klešťová proudová sonda LEM HEME PR30 – přenos 100 mV / 1 A
- F – vstupní filtr Siemens 6SE7016-0EP87-0FB0 – třífázový 380 - 480 V,
50-60Hz, 6A
- T – filtrační tlumivka Siemens 4EP3701-3US – třífázová tlumivka 460 V,
6,1 A, 3,465 mH
- IRC – inkrementální snímač otáček
- FM – frekvenční měnič Siemens MASTERDRIVES VC 6SE7087
- RU – řízený usměrňovač napětí Siemens SIMOREG 6RA24
- AS – asynchronní motor Siemens 1LA51106-BAA10-Z
- SS – stejnosměrný motor Siemens 1GL5104-0EB20-6VV1-Z
- Z – stejnosměrný zdroj napětí TESLA EA1605 s.č.5076/86 – používáno 12 V
DC

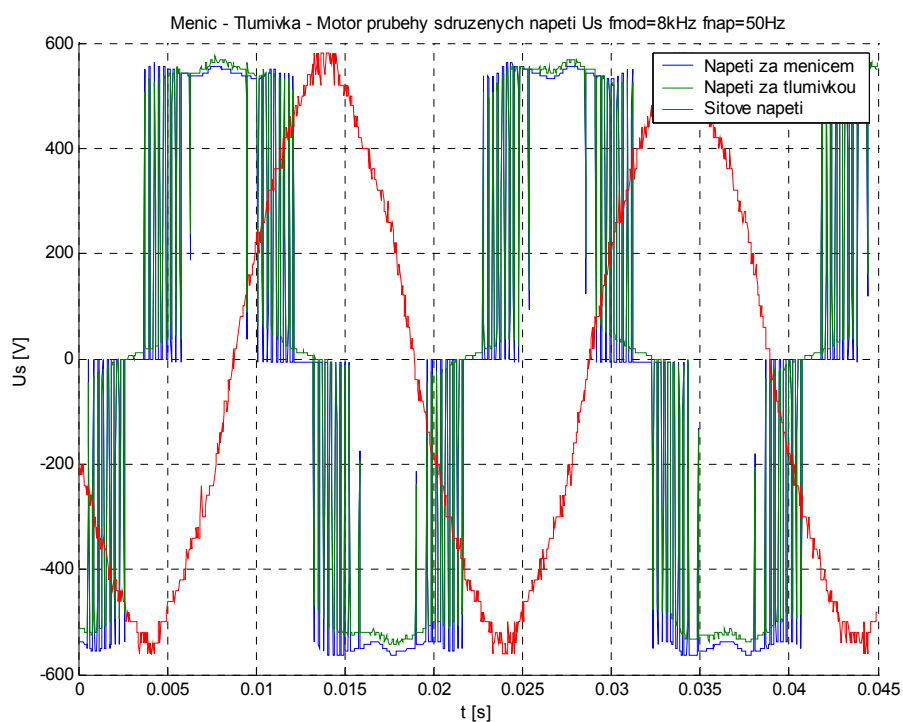
Příloha č. 2: Změřené průběhy v uspořádání FM – T – AM



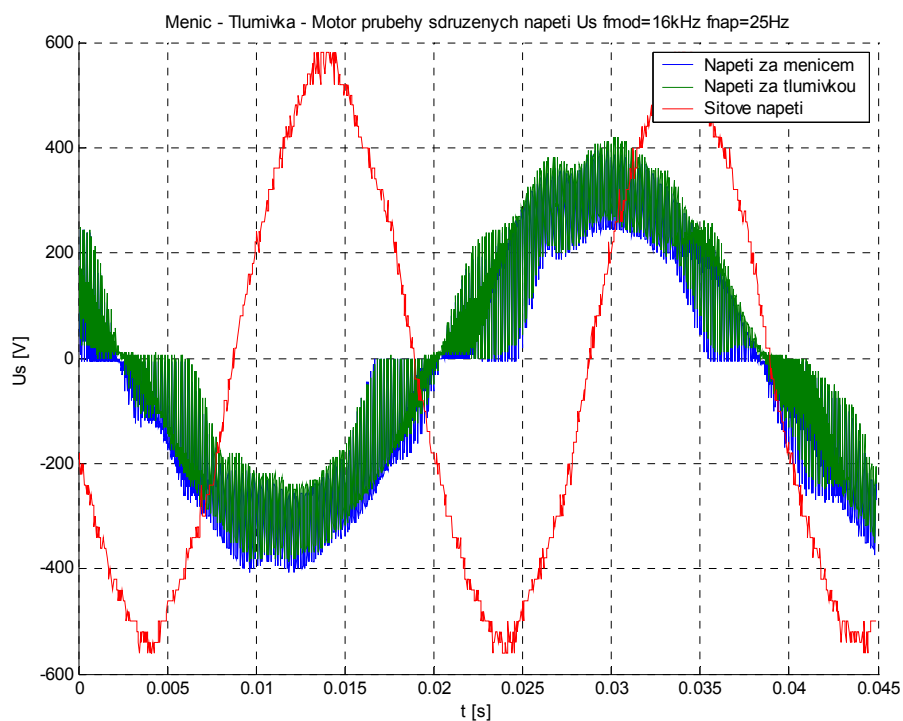
Příloha č. 2 graf č. 1 Průběhy sdruženého napětí v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



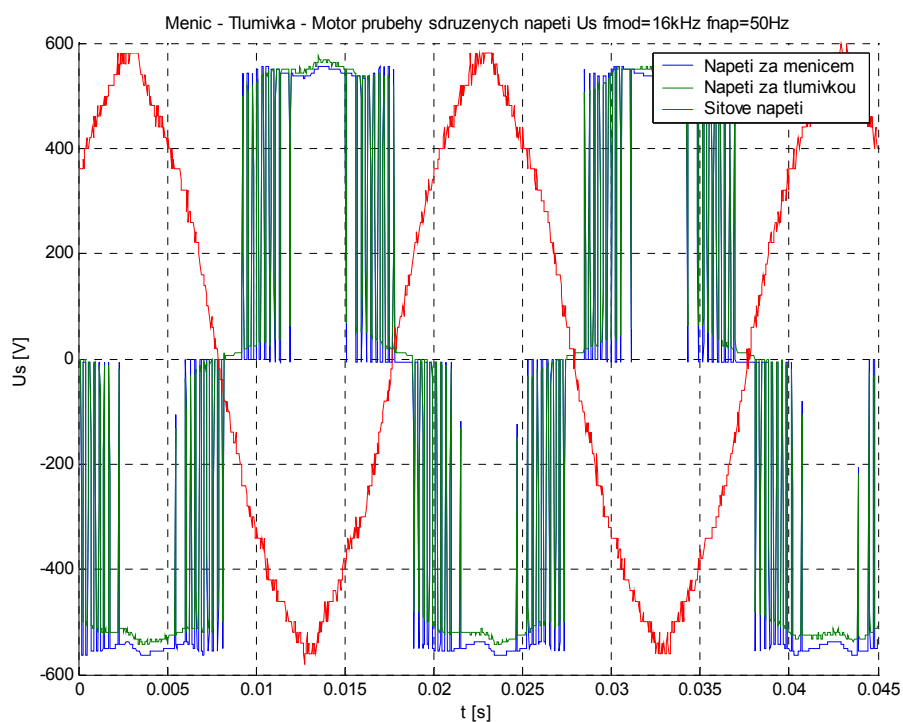
Příloha č. 2 graf č. 2 Průběhy sdruženého napětí v zapojení M-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



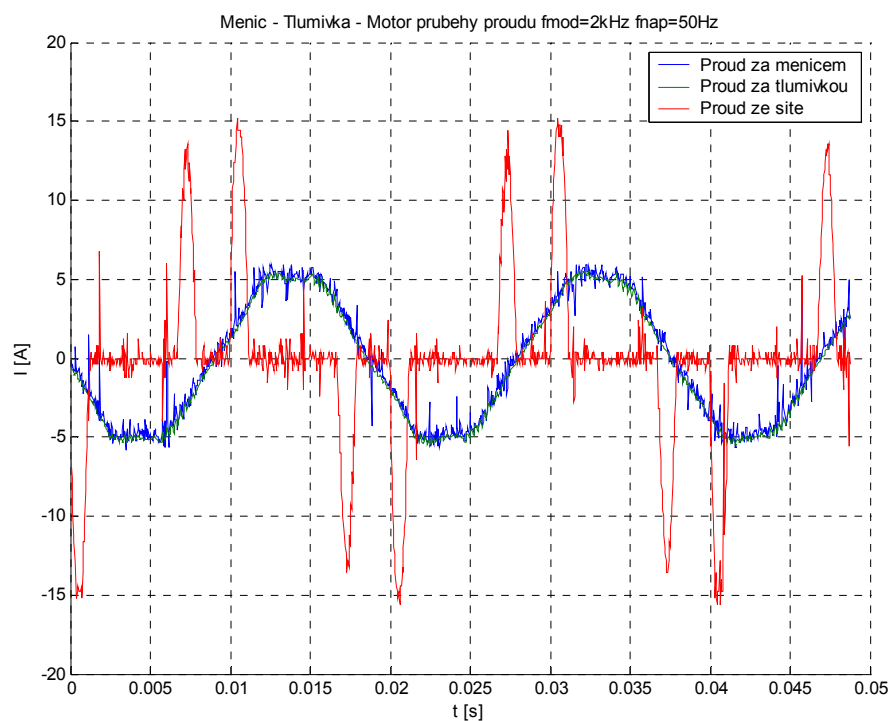
Příloha č. 2 graf č. 3 Průběhy sdruženého napětí v zapojení FM-T-AM $f_{mod} = 8 \text{ kHz}$
 $f_{nap} = 50 \text{ Hz}$



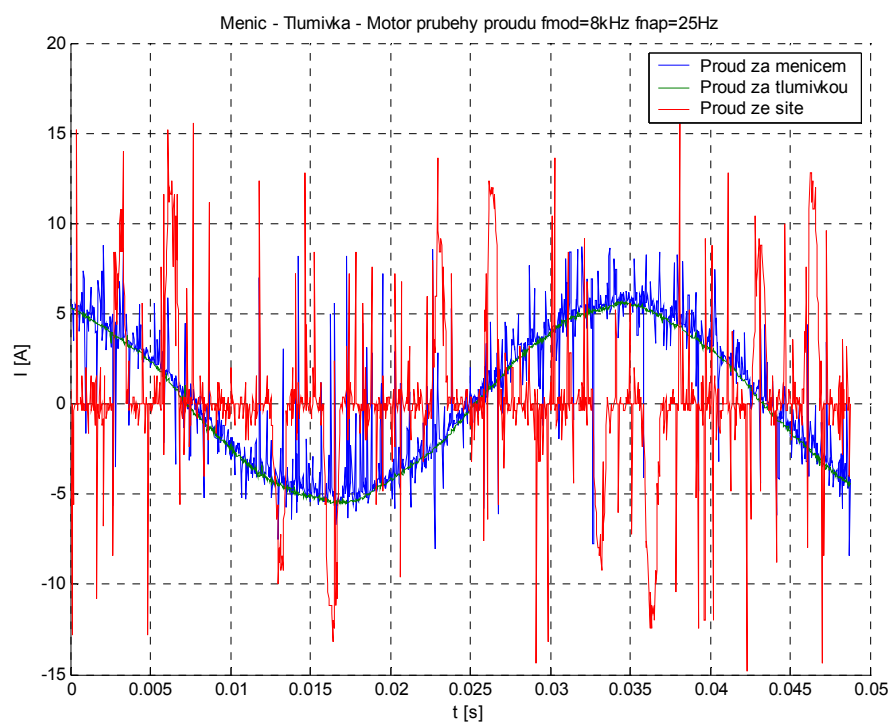
Příloha č. 2 graf č. 4 Průběhy sdruženého napětí v zapojení FM-T-AM
 $f_{mod} = 16 \text{ kHz}$, $f_{nap} = 25 \text{ Hz}$



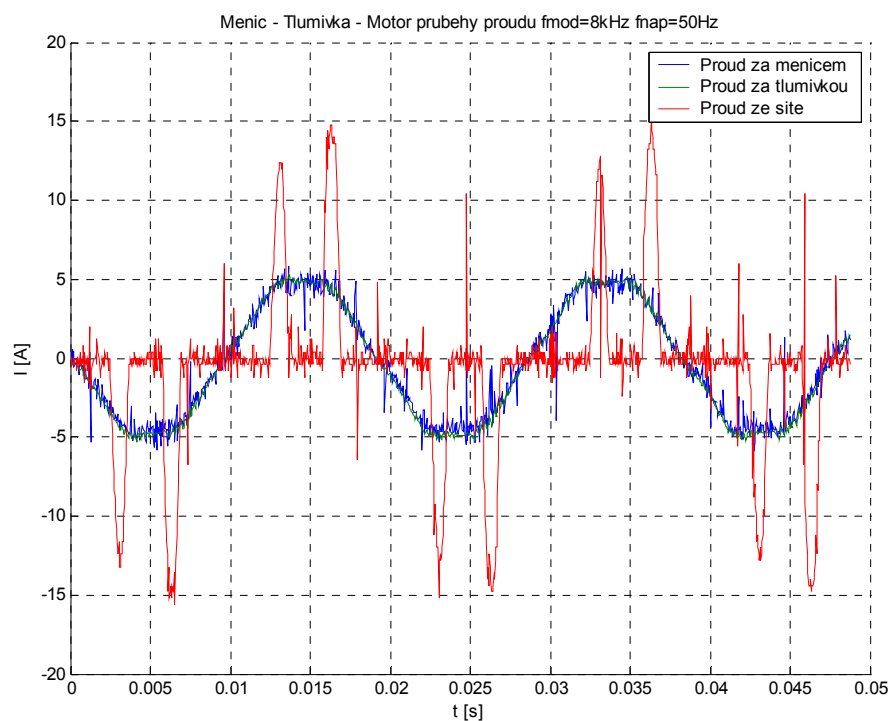
Příloha č. 2 graf č. 5 Průběhy sdruženého napětí v zapojení FM-T-AM
 $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



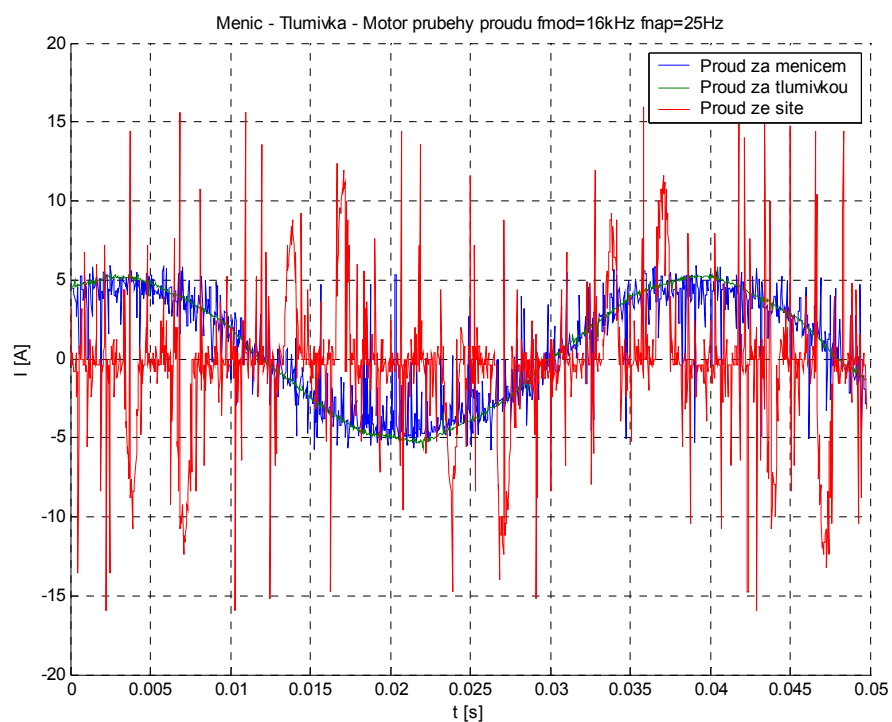
Příloha č. 2 graf č. 6 Průběhy proudů v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



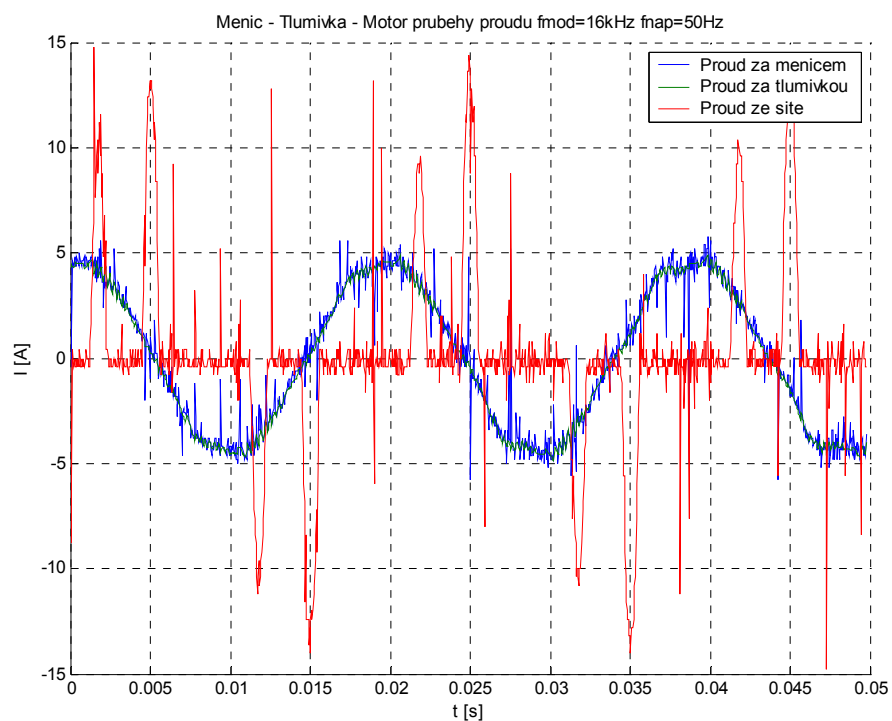
Příloha č. 2 graf č. 7 Průběhy proudů v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



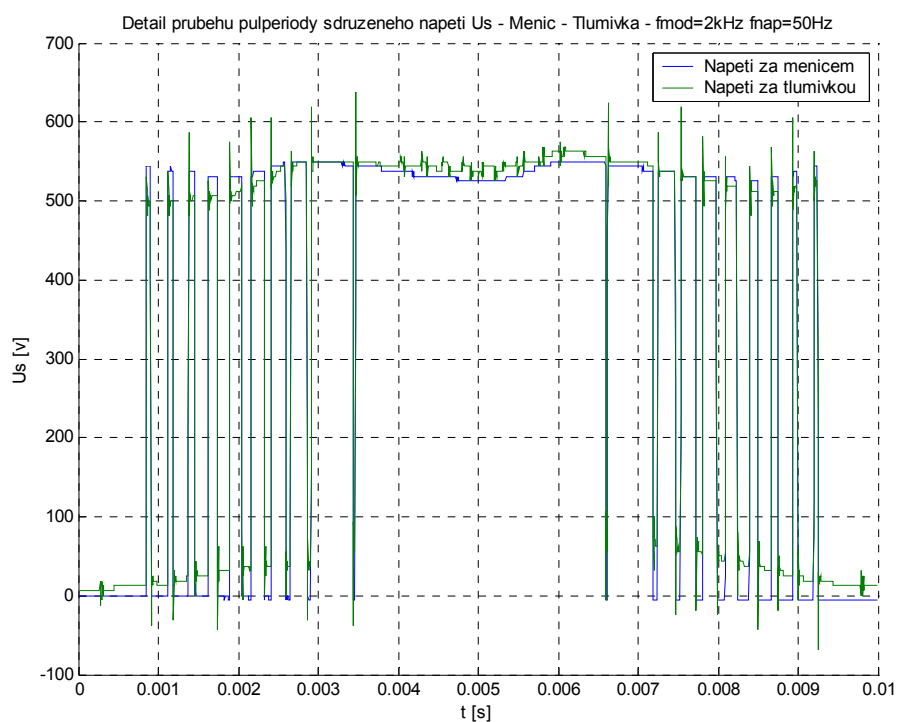
Příloha č. 2 graf č. 8 Průběhy proudů v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



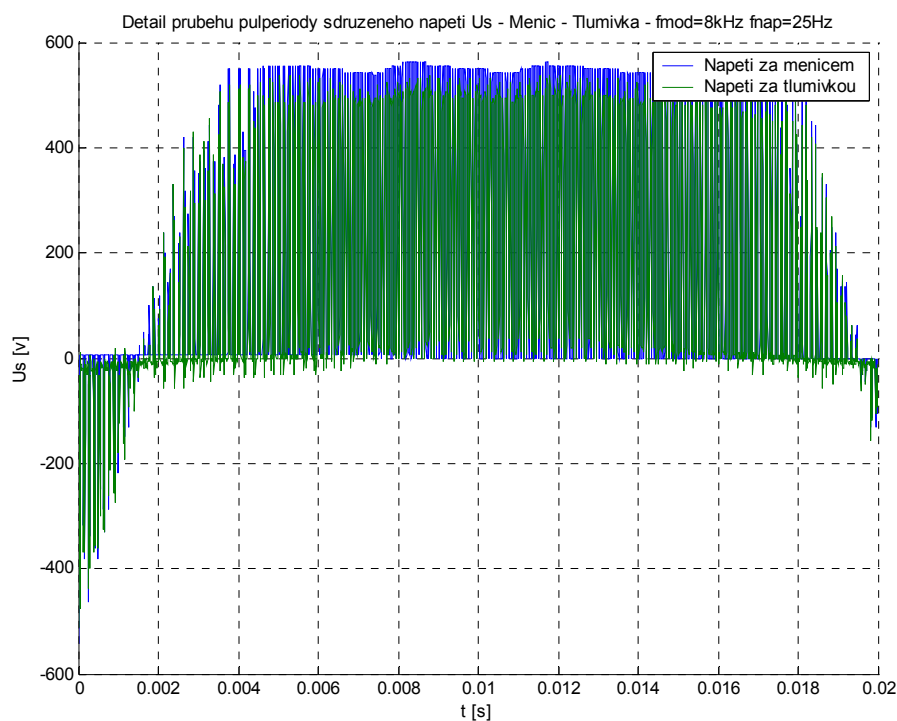
Příloha č. 2 graf č. 9 Průběhy proudů v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



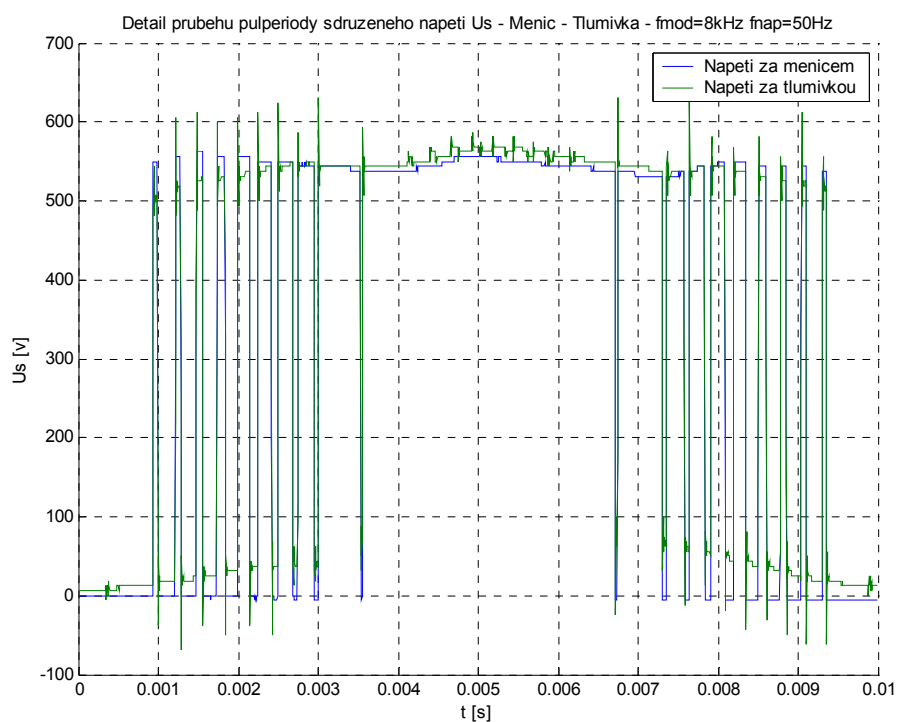
Příloha č. 2 graf č. 10 Průběhy proudů v zapojení FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$,
 $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



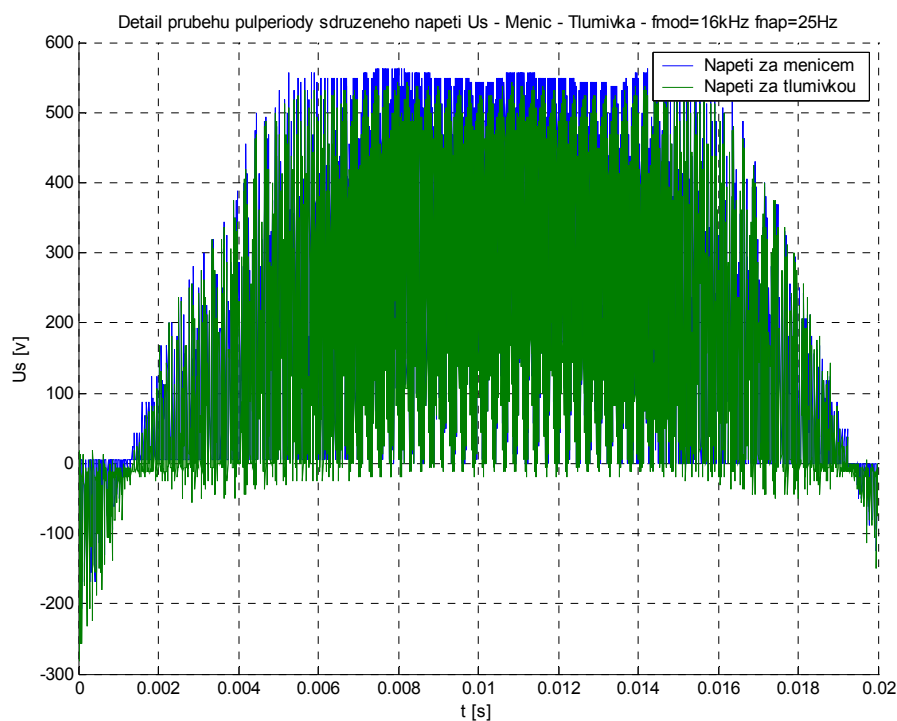
Příloha č. 2 graf č. 11 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 2\text{kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50\text{ Hz}$



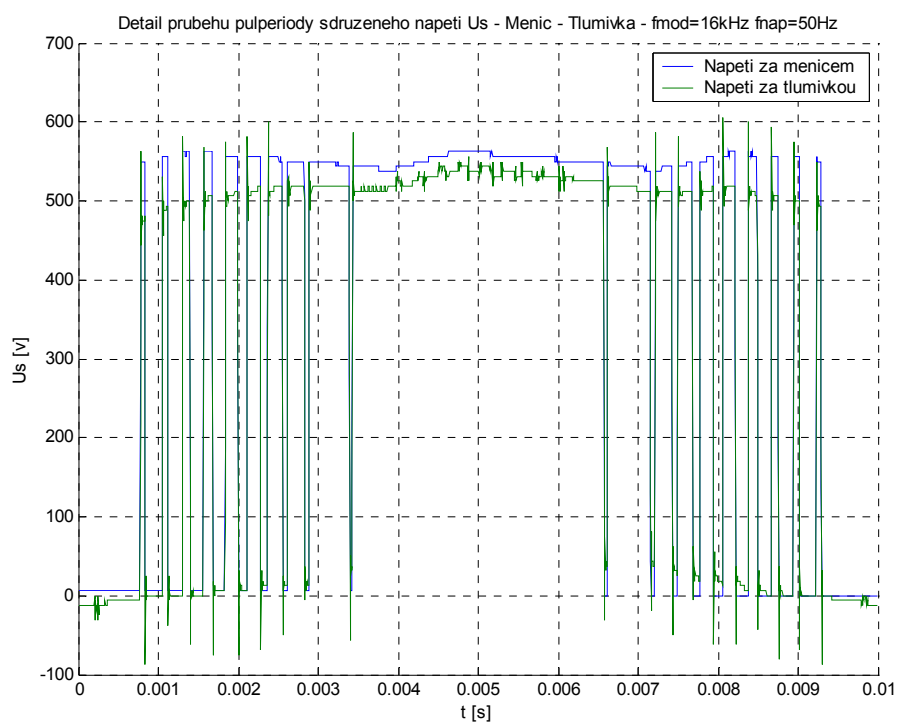
Příloha č. 2 graf č. 12 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8\text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25\text{ Hz}$



Příloha č. 2 graf č. 13 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

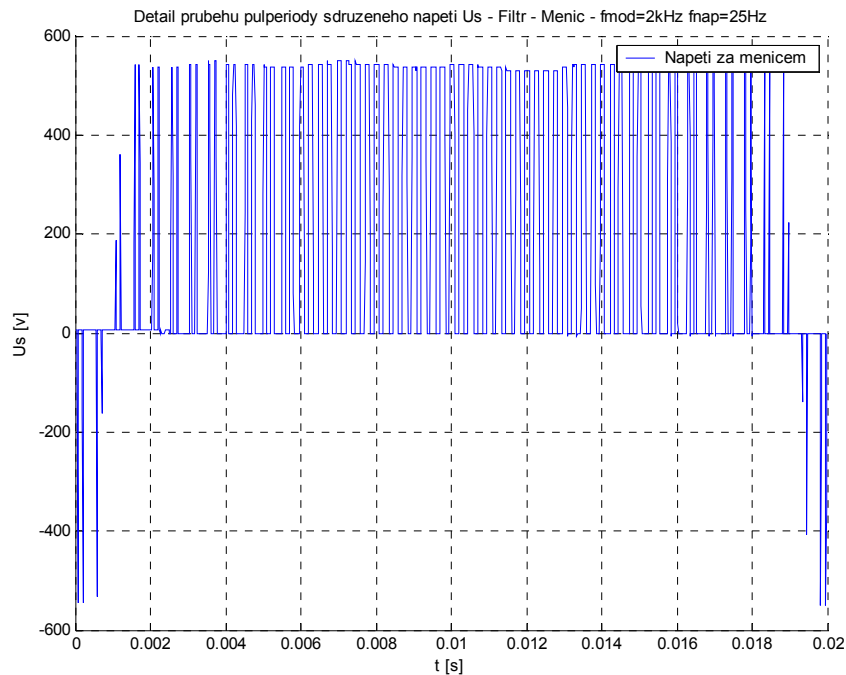


Příloha č. 2 graf č. 14 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$

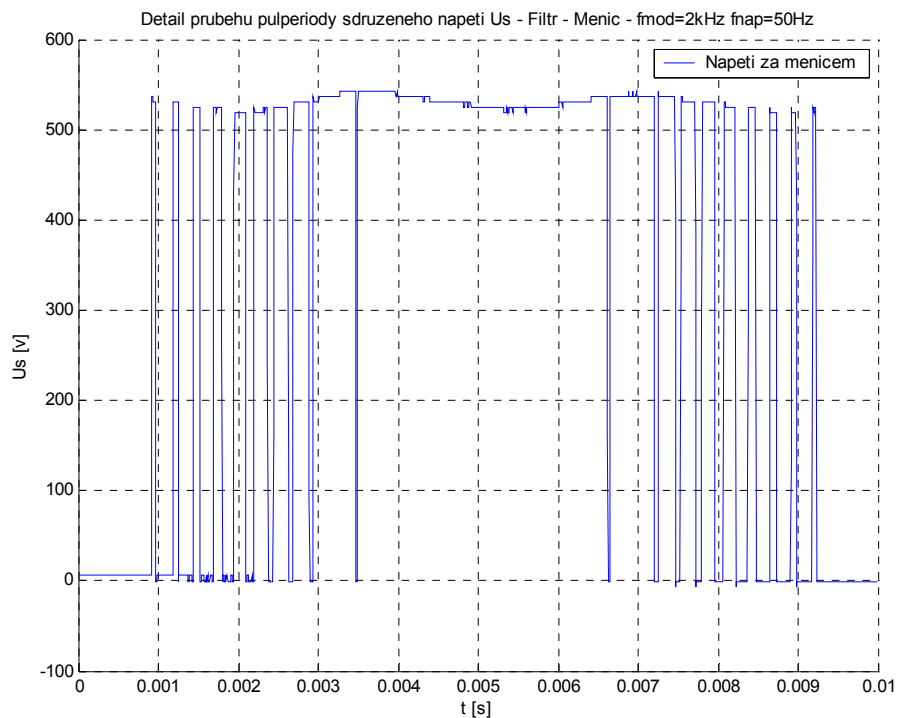


Příloha č. 2 graf č. 15 Průběhy kladné pulperiody sdružených napětí v kombinaci
FM-T-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$

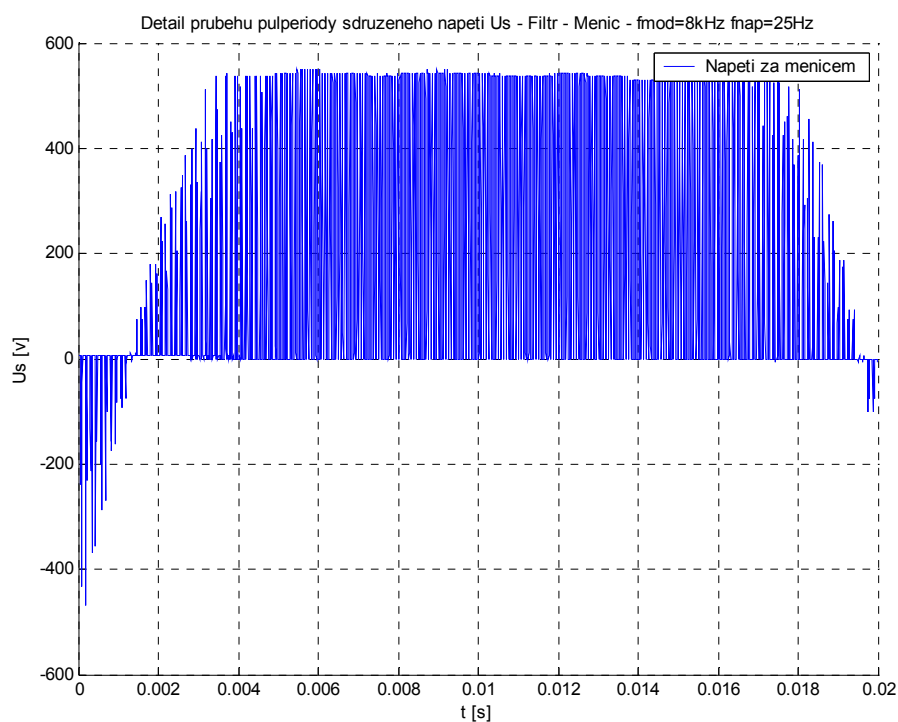
Příloha č. 3: Změřené průběhy v uspořádání F – FM – AM



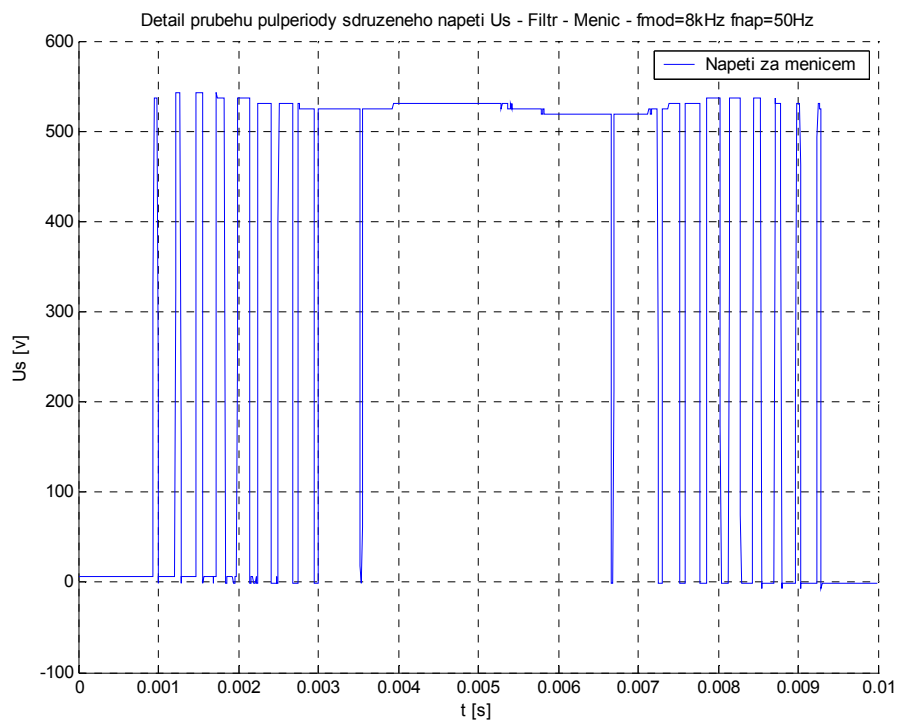
Příloha č. 3 graf č. 1 Průběhy kladné půlperrody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



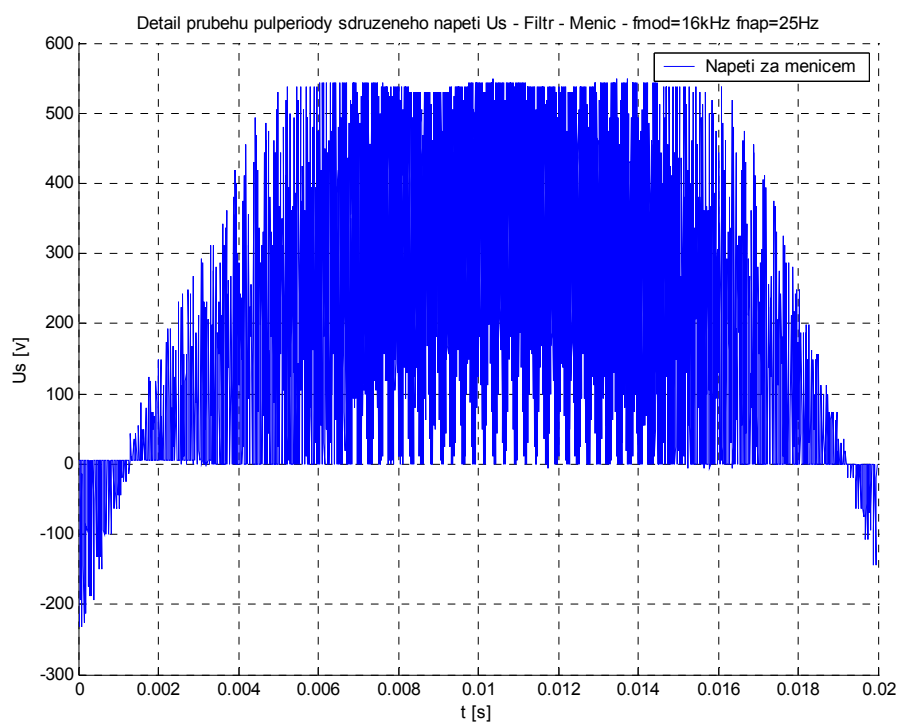
Příloha č. 3 graf č. 2 Průběhy kladné půlperrody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



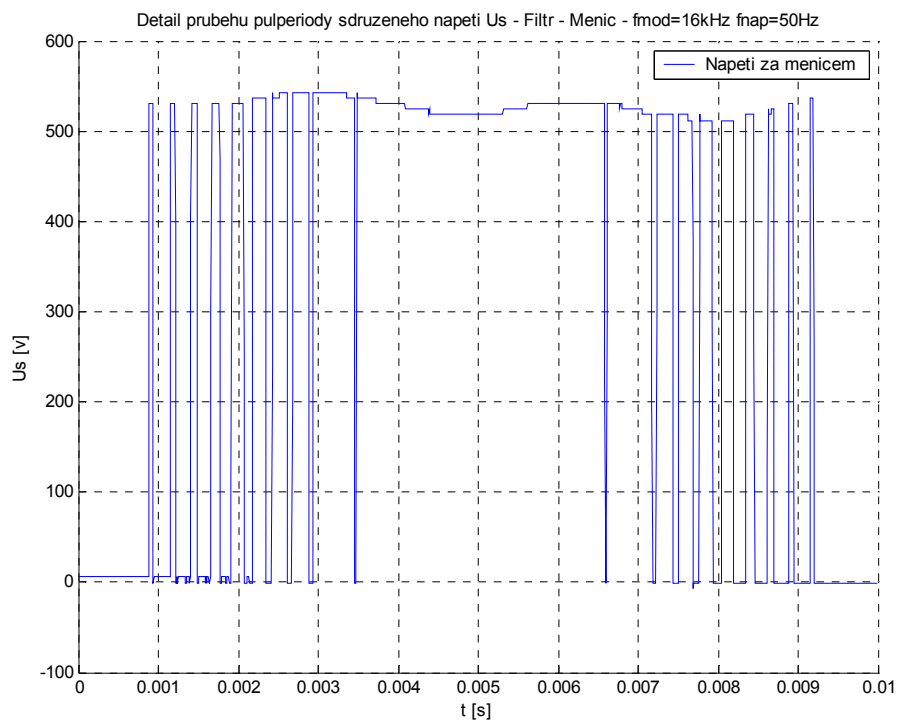
Příloha č. 3 graf č. 3 Průběhy kladné půlperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



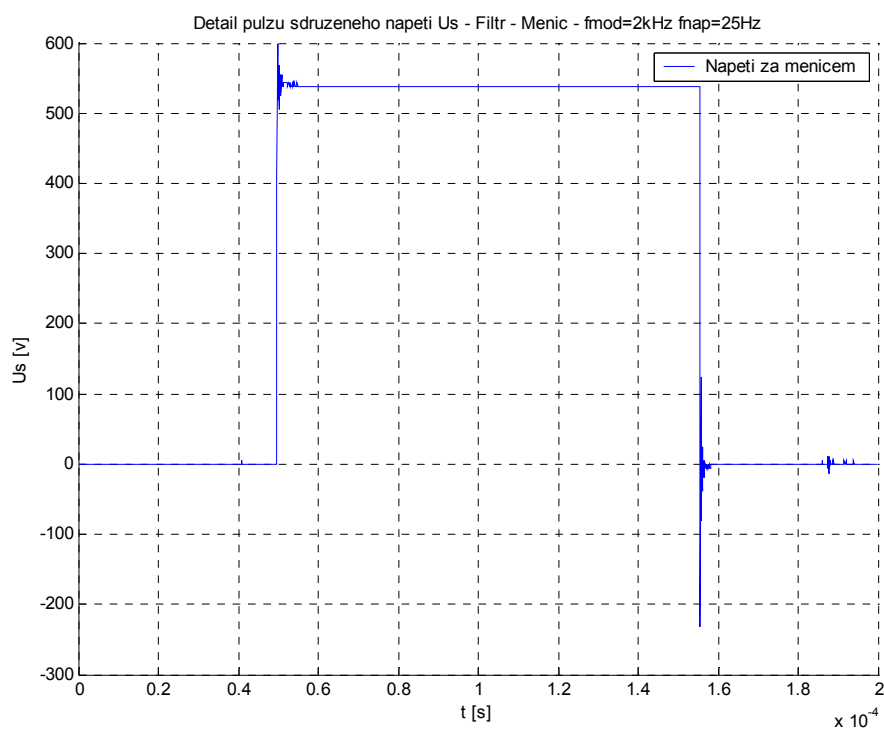
Příloha č. 3 graf č. 4 Průběhy kladné půlperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



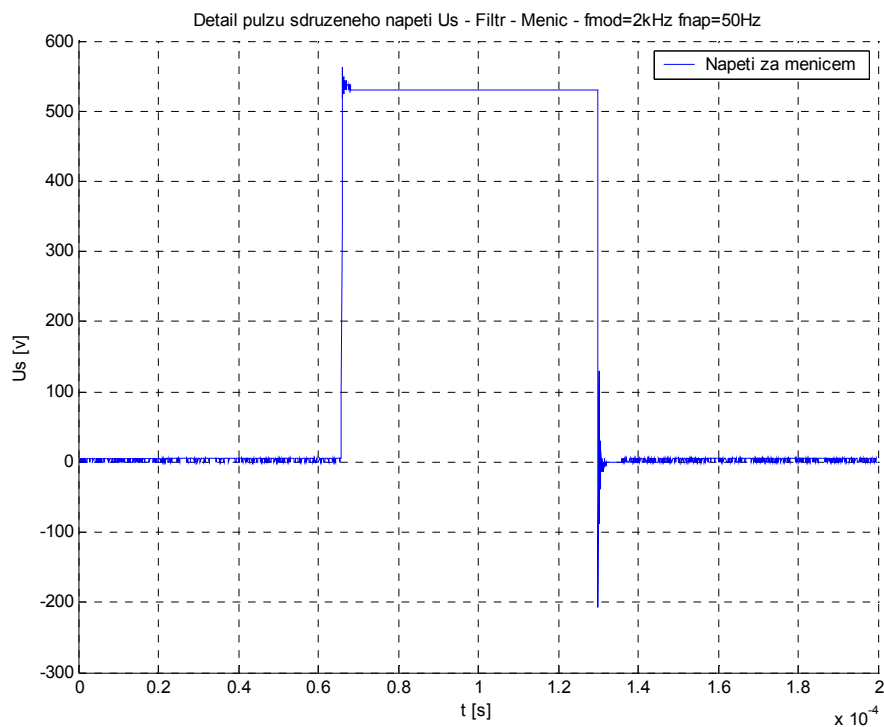
Příloha č. 3 graf č. 5 Průběhy kladné půlperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



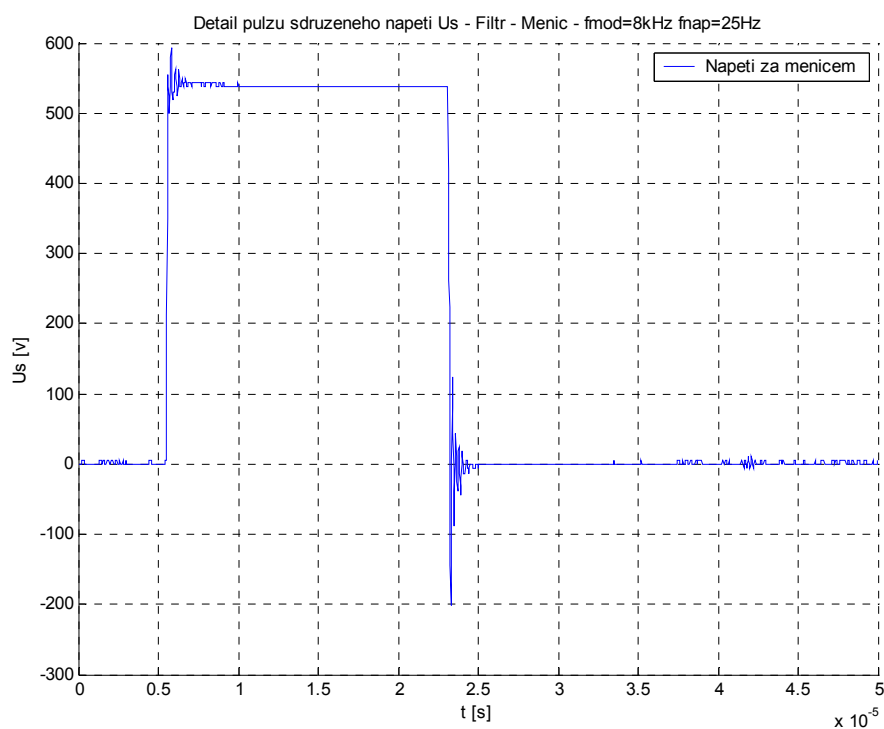
Příloha č. 3 graf č. 6 Průběhy kladné půlperiody sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



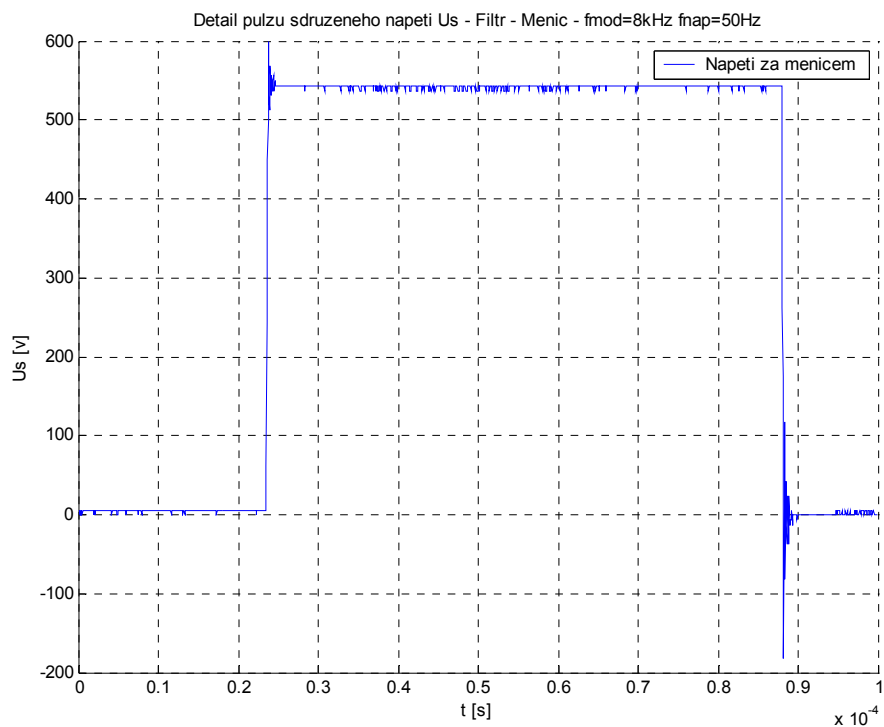
Příloha č. 3 graf č. 7 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



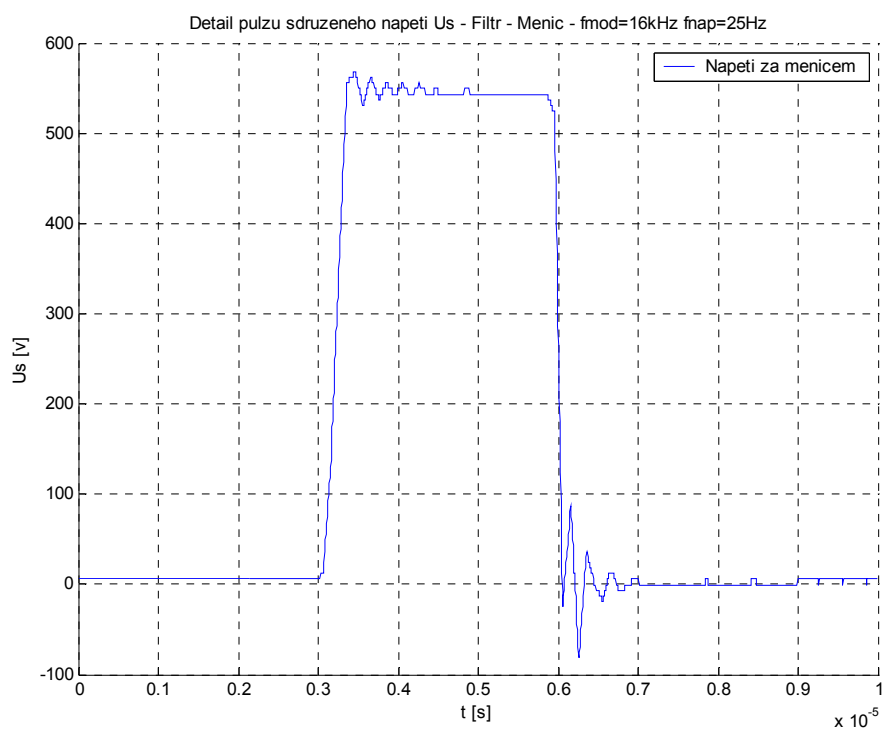
Příloha č. 3 graf č. 8 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 2 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



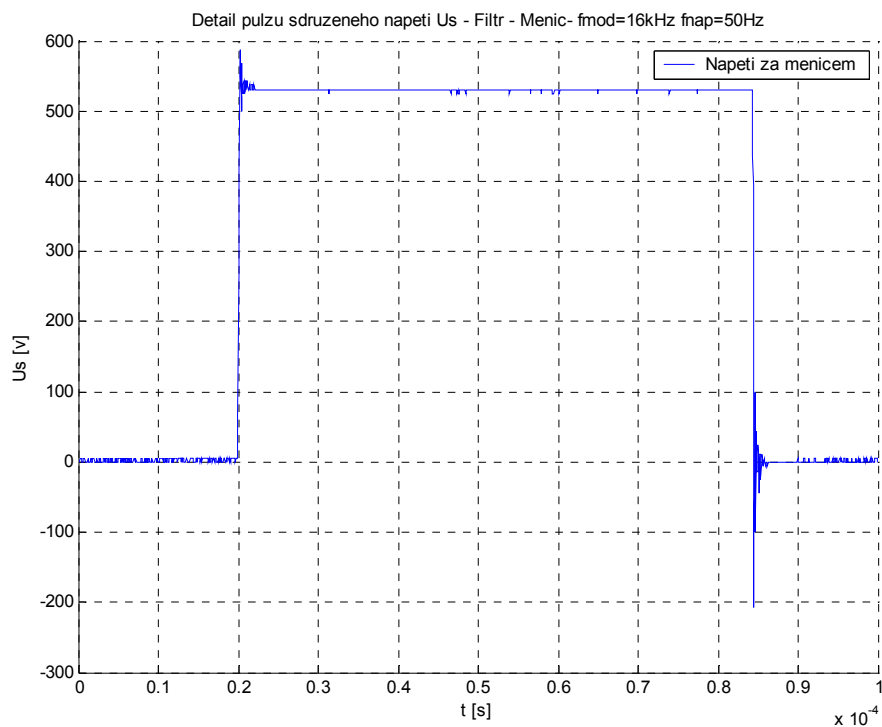
Příloha č. 3 graf č. 9 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Příloha č. 3 graf č. 10 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 8 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$



Příloha č. 3 graf č. 11 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 25 \text{ Hz}$



Příloha č. 3 graf č. 12 Detail pulzů sdružených napětí v kombinaci F-FM-AM
 $f_{\text{mod}} = 16 \text{ kHz}$, $f_{\text{nap}} = 50 \text{ Hz}$